

独立运行微电网平抑有功差额波动研究

石磊¹, 伍阳², 刘皓明²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 独立运行的微电网中, 由于负荷峰谷差特性以及分布式电源的存在, 一天中的有功功率差额存在较大的波动性, 不利于后备电源的稳定经济运行。通过配置合理的储能装置, 采取有效的充放电策略, 后备电源在出力平稳的前提下, 微电网频率能保持在规定的范围之内。以此为目标, 建立了独立运行微电网有功功率差额波动最小的数学模型, 充分考虑储能装置的荷电状态(SOC)、充放电效率及循环控制等因素。采用动态规划算法求解, 并通过仿真算例分析, 验证了所建模型的有效性以及动态规划算法的适用性。

关键词: 微电网; 独立运行; 有功差额; 储能装置; 动态规划

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2012)03-0001-04

随着传统能源供应的日益紧张以及用电需求的不断提高, 人们对可就地消纳可再生能源发电、自治、稳定的微电网的广泛应用变得更加期待^[1,2]。目前, 微电网的技术发展已经比较成熟, 但仍存在很多问题有待解决。微电网运行分为并网运行和独立运行2种模式。对于独立运行的微电网, 由于分布式发电, 如风力发电、光伏发电, 受自然因素的影响, 其输出功率具有间歇性、随机性和波动性^[3], 以及负荷峰谷差特性, 一天中的有功功率差额存在较大的波动性^[4], 不利于后备电源的稳定经济运行。对此, 许多学者提出了通过投切负荷和调度后备电源出力的方法平抑有功功率差额波动。文献[5]和[6]提出了投切负荷的方法, 以减小微电网有功功率差额, 该方法虽然能有效减小微电网有功功率的差额, 但由于有功差额存在明显的波动, 频繁地投切负荷, 既不能保证负荷用电的可靠性, 也不利于微电网的稳定。文献[7]提出了采用燃料电池作为后备电源, 由于有功差额的波动性, 需要频繁地对后备电源进行调度, 必然对后备电源性能要求很高, 且控制复杂, 还不经济。本文以独立运行的微电网为研究对象, 采用储能装置平抑微电网有功功率差额的波动, 使系统有功差额在很小范围内变化, 更利于后备电源稳定经济运行。建立独立运行微电网有功功率差额最小的数学模型, 充分考虑储能装置的荷电状态(SOC)等因素。通过动态规划算法对数学模型求解和算例仿真, 验证了数学模型的有效性以及动态规划算法应用于平抑独立运行微电网有功差额波动问题的适用性。

1 数学模型

1.1 前提假设

通常将微电网一天的有功功率差额总体情况作为考虑对象, 对储能装置的出力调度以5 min为控制周期。光伏发电及风力发电等微电源, 一般通过控制使其工作在最大功率输出状态, 其输出受自然条件的影响, 在该数学模型中, 作为已知预测量^[8]。储能系统平抑微电网有功差额波动是一个较复杂的优化问题, 为使建立模型更合理, 作如下假设:

(1) 一天内的总负荷需求和微电源的出力曲线已知;

(2) 储能装置响应时间远小于控制周期, 忽略不计;

(3) 同一控制周期内, 储能装置处于同一充放电状态;

(4) 电力网络损耗在更高一级的控制调度中计及, 文中所建模型仅计及储能装置充放电效率和自放电现象。

1.2 目标函数

根据负荷需求和微电源的出力, 通过控制储能装置的充放电, 以尽可能地平抑微电网有功差额波动为目的建立目标函数, 为取得最优解, 加入了对不符合条件取值的惩罚^[9,10]。系统的数学模型的目标函数可用数学式表示如下:

$$\min f = \sum_{i=1}^M [\Delta P(i) - P_{ES}(i)]^2 \quad (1)$$

式中: M 为控制周期数, 取 $M=288$; $P_{ES}(i)$ 为第 i 个控制周期储能装置输出功率; $\Delta P(i)$ 为第 i 个控制周期内负荷需求功率与微电源输出有功之差。

$$\Delta P(i) = P_L(i) - P_G(i) \quad (2)$$

$$P_{ES}(i) \Delta T = N \Delta C(i)$$

$$= N[u_d(i)C_d(i) - u_c(i)C_c(i)] \quad (3)$$

式中: $P_G(i)$ 为第 i 个控制周期内系统中微电源出力; $P_L(i)$ 为第 i 个控制周期内负荷需求; ΔT 为控制

周期; N 为储能系统中储能装置的配置数量; $\Delta C(i)$ 为单个储能装置第 i 个控制周期增加电量; $C_d(i)$, $C_c(i)$ 分别为单个储能装置在第 i 控制周期的实际放电和充电电量; $u_c(i)$, $u_d(i)$ 分别为第 i 个控制周期内储能装置充电和放电的状态标志,满足:

$$\begin{cases} u_c(i)=1, u_d(i)=0, P_{ES}(i)=-P_c & \text{充电时} \\ u_c(i)=0, u_d(i)=1, P_{ES}(i)=P_d & \text{放电时} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 约束条件

1.3.1 SOC 约束

$$SOC^{\min} \leq SOC(i) \leq SOC^{\max} \quad (5)$$

式中: $SOC^{\min}$, $SOC^{\max}$ 分别为储能装置荷电状态最小和最大允许值; $SOC(i)$ 为第 i 个控制周期单个储能装置的荷电状态。

$$\begin{cases} SOC(i)=C(i)/C_N \\ C(i)=(1-\sigma)C(i-1)+\Delta C(i) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C(i)$ 为第 i 个控制周期单个储能装置的剩余电量; C_N 为单个储能装置的额定电量。

1.3.2 充放电约束

$$\begin{cases} 0 \leq C_c(i) \leq \min\{C_N SOC^{\max} - (1-\sigma)C(i-1), P_c \eta_c \Delta T\} \\ 0 \leq C_d(i) \leq \min\{(1-\sigma)C(i-1) - C_N SOC^{\min}, P_d \eta_d \Delta T\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_c , P_d 分别为储能装置的额定充电和放电功率; σ 为储能装置的自放电率; η_c , η_d 分别为储能装置充电和放电效率。

1.3.3 循环控制约束

$$SOC(0)=SOC(M) \quad (8)$$

式中: $SOC(0)$, $SOC(M)$ 分别为一天开始和结束时储能装置的荷电状态。

1.4 模型分析

由数学模型可知,采用传统的优化算法进行优化时,目标函数有 288 个控制变量 $P_{ES}(i)$, $i=\{1, 2, \dots, 288\}$, 控制变量较多,其解的空间很大,难以寻找到最优解,且计算较费时,收敛性差。

实际上,数学模型是一个多阶段非线性规划问题,即属于动态规划的问题。此时的目标函数仅含有 1 个动态变量,存在多个控制周期内状态变量间耦合的问题,即可将数学模型按动态规划问题求解。采用动态规划算法求解此数学模型,控制变量明显减少,容易求解,效率高,收敛性好,且能获得最优解^[11]。

2 模型求解

2.1 动态规划算法

动态规划是研究多阶段决策过程最优解的一

种有效方法。

适用动态规划求解问题,必须具备下列特征^[12]:

(1) 问题必须能划分成若干个相互关联的阶段,每个阶段皆具有状态变量,相邻阶段由状态变量联系;(2) 每个阶段的某个决策变量能使该阶段某一状态变量转换成下一阶段某一状态变量;(3) 每个阶段所做的最佳决策只影响其后的各阶段,而对前一阶段的决策无影响。

由第 2 节可知,文中建立的数学模型是一个多阶段非线性规划问题。目标函数为求取多个控制周期内储能装置输出有功与微电网有功差额的差值最小化,且约束方程包含前一控制周期的储能装置剩余电量,符合动态规划求解的基本特征。

2.2 转化模型

采用动态规划算法求解模型,必须将模型转化为动态规划可操作的方式,涉及到阶段、状态、决策、策略^[12]。

(1) 阶段。将 1 天分为若干阶段(即控制周期),其中任意阶段标记为阶段 k , 文中 $k=\{1, 2, \dots, 288\}$ 。

(2) 状态。将储能装置的充放电动作设为状态。

(3) 决策与策略。以储能装置的充放电动作为状态,那么储能装置每个阶段的充放电电量就是决策,144 阶段的不同决策组合就是策略。

$$\Delta C(k) \in \{\Delta C \mid -u_d(k) \min\{(1-\sigma)C(k-1) -$$

$$C_N SOC^{\min}, P_d \eta_d \Delta T\} \leq \Delta C \leq u_c(k) \min$$

$$\{C_N SOC^{\max} - (1-\sigma)C(k-1), P_c \eta_c \Delta T\}\} \quad (9)$$

(4) 状态转移方程。

$$C(k)=(1-\sigma)C(k-1)+\Delta C(k) \quad (10)$$

(5) 阶段目标函数。

$$v(k)=[\Delta P(k)-P_{ES}(k)]^2 \quad (11)$$

(6) 最终目标函数。

$$\min f = \sum_{k=1}^M [\Delta P(k)-P_{ES}(k)]^2 \quad (12)$$

(7) 动态规划算法递归方程。

$$f[C(k)] = \min_{\Delta C(k) \in \{\Delta C\}} \{f[C(k-1)] + v[C(k-1), \Delta C(k)]\} \quad (13)$$

2.3 算法框图

动态规划算法应用于独立微电网系统的主要求解过程分为 3 步。

第 1 步,在第 k 个阶段中,首先在 $[C_N SOC^{\min}, C_N SOC^{\max}]$ 范围内取所有可能的 $C_i(k)$;在 $\Delta C(k) \in \{\Delta C\}$ 取值范围内,根据状态的取值,选取所有可能的 $\Delta C_j(k)$ 。为了方便计算,状态方程求解过程中采

用逆序求解,即根据第 k 个阶段数据和状态转移方程逆函数求得 $C_{ij}(k-1)$,再根据约束条件 $C_N SOC^{\min} \leq C_{ij}(k-1) \leq C_N SOC^{\max}$ 去除不符合条件的 $C_{ij}(k-1)$ 。

第 2 步,根据第 1 步最后得到的 $C_{ij}(k-1)$ 和与其对应的 $\Delta C_j(k)$ 计算目标函数值,对于相同的 $C_{ij}(k-1)$,通过比较目标函数,选取储能装置剩余电量最优值。

第 3 步,判断是否计算完所有的控制周期,若没有,返回到第 1 步。

根据上面的 3 个步骤,应用动态规划算法求解的解法框图如图 1 所示。

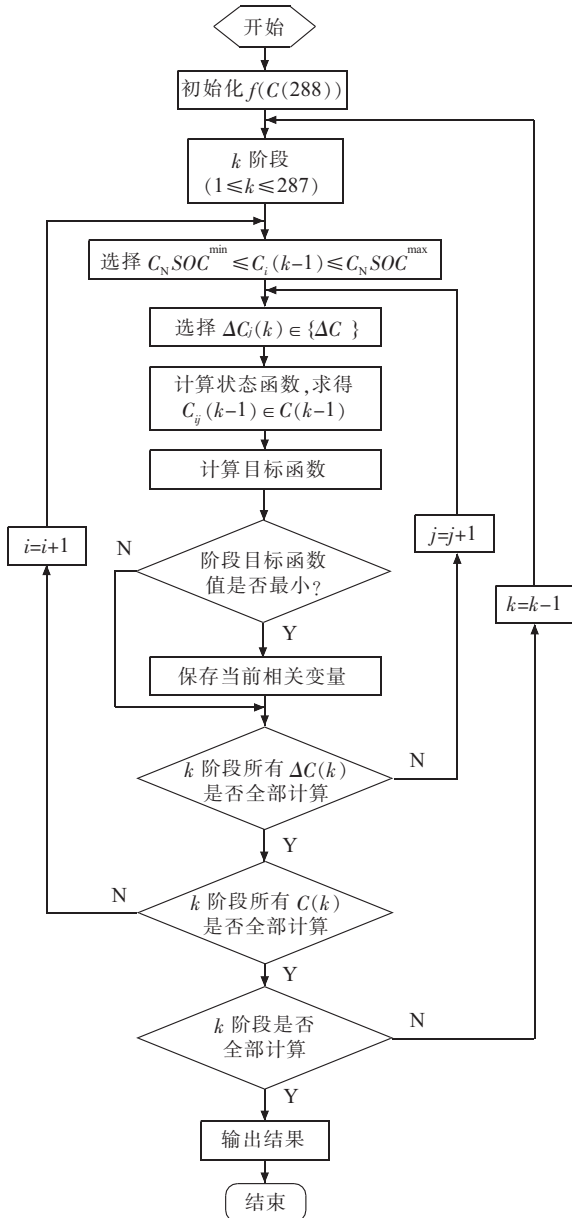


图 1 动态规划法的解法框图

3 仿真分析

仿真分析中,独立微电网的负荷有功需求最大值为 1 100 kW,微电源的最大有功输出值为 850

kW,微电源的输出功率数据和负荷需求曲线如图 2 所示。储能系统的单个储能装置的规格为:额定充电功率和放电功率均为 100 kW,额定容量为 480 kW·h,充放电率均取 87%,SOC 允许的最大值和最小值分别为 20%和 100%。

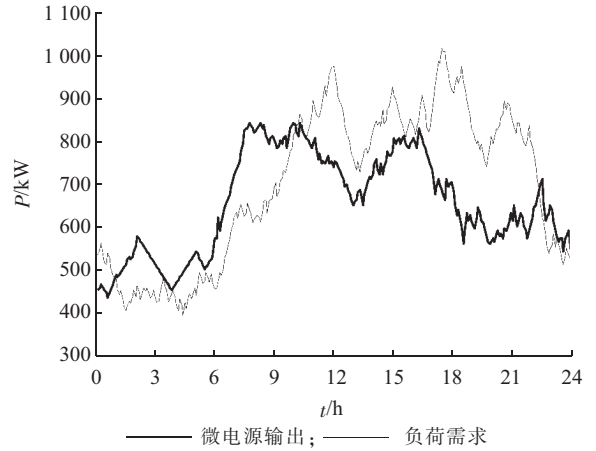
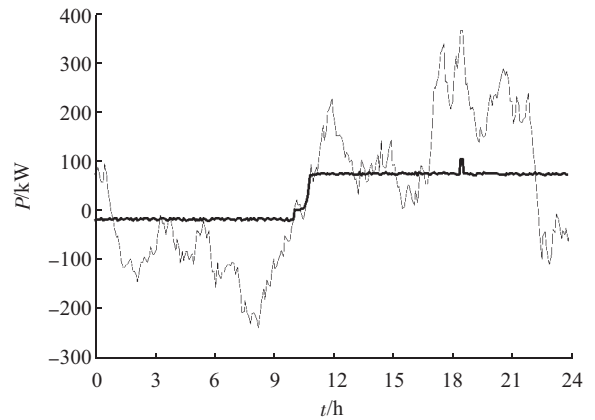
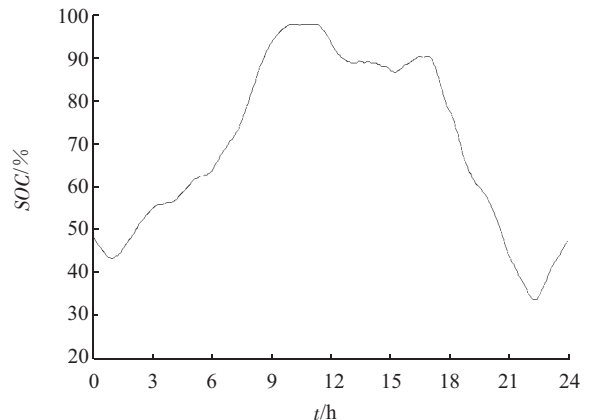


图 2 微电源输出功率及负荷需求功率

仿真分析中,当储能装置配置数量 $N=3$ 和 $N=6$ 时,分别进行了计算,并给出了 2 种情况下的储能系统平抑有功功率差额的效果图和储能系统的变化仿真波形图,如图 3 和图 4 所示。



—— 储能平抑前的有功差额;
—— 储能平抑后的有功差额
(a) 储能平抑有功功率差额的效果



(b) 储能的 SOC 随时间变化曲线

图 3 $N=3$ 时系统的平抑效果及储能系统 SOC 曲线

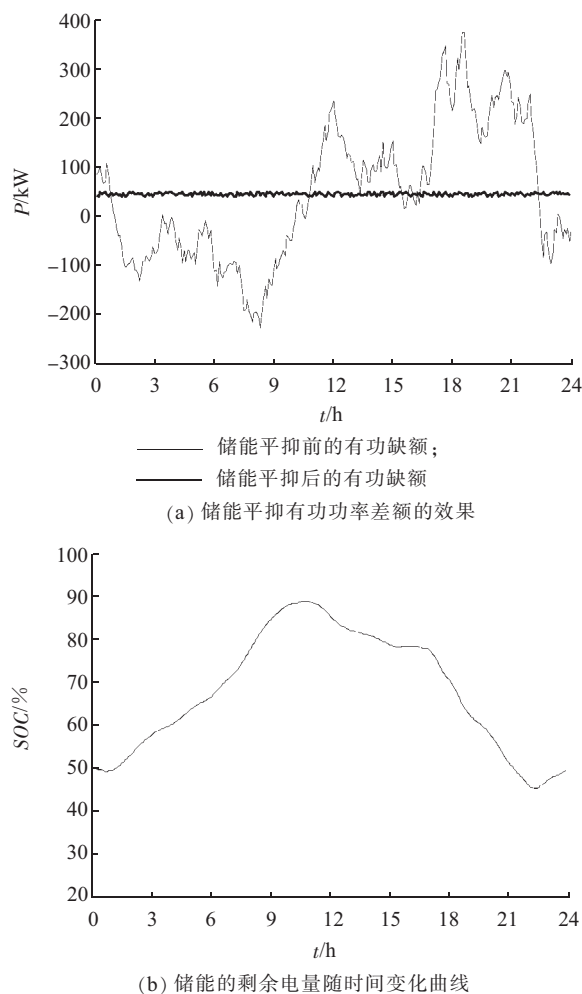


图4 $N=6$ 时系统的平抑效果及储能系统 SOC 曲线

从图3(a)可知,经过储能装置的合理优化调度,使得系统有功功率差额波动得到有效平抑;但由于储能装置容量配置不足,无法保证一天内有功差额恒定,同时受最大充放电功率限制,可能存在个别尖峰无法平抑。由图4(a)可知,当储能容量配置合理时,可使得全天系统有功功率差额恒定,有利于后备电源调度的平稳性,提高了系统运行的经济性。从图3和图4中(b)可知,仿真中,能满足储能的SOC约束和循环控制约束等约束条件。

4 结束语

以储能装置平抑微电网有功功率差额波动为目标,计及储能装置的SOC、充放电效率等因素,建立了数学模型,考虑到不同控制周期内的储能装置剩余电量存在耦合性,采用动态规划算法求解,仿真分析得出如下结论:(1)独立运行的微电网,需要合理配置一定容量的储能装置,以保证系统平稳经济运行;(2)动态规划算法有效地解决了数学模型中状态变量耦合问题,且通过算例仿真,验证了该算法的

适用性;(3)储能平抑独立运行微电网有功功率差额的效果与其最大充放电功率和容量有关。

参考文献:

- [1] LASSETER R, AKHIL A, MARMAY C, et al. Integration of Distributed Energy Resources: the CERTS Microgrid Concept [EB/OL]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>, 2007-04-01.
- [2] MARNAY C, RUBIO F J, SIDDIQUI A S. Shape of the Microgrid [EB/OL]. <http://escholarship.org/uc/item/9fw029wb>, 2007-01-01.
- [3] TAN H G, WANG B, LIU D C, et al. Analysis of Distributed Generation System Based on Micro-Grid and Its Impaction on Voltage Distribution [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2011.
- [4] 孙超. 独立运行的光伏系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2009.
- [5] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G, et al. Control Strategies for Microgrids Emergency Operation [C]. International Conference on Future Power Systems, 2005.
- [6] CHATZIVASILADIS S J, HATZIARGYRIOU N D, DIMEAS A L. Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [7] NAYAR C V, ASHARI M, KEERTHIPALA W W L. A Grid-interactive Photovoltaic Uninterruptible Power Supply System Using Battery Storage and a Back up Diesel Generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (3): 348-353.
- [8] 陈达威, 朱桂萍. 微电网负荷优化分配[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 45-49.
- [9] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128.
- [10] 丁明, 徐宁舟, 毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66-72.
- [11] ZHANG L, LI Y Y. Optimal Energy Management of Hybrid Power System with Two-scale Dynamic Programming [C]. American Control Conference, 2011.
- [12] 刘光中. 动态规划一理论及其应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.

作者简介:

石磊(1978),男,江苏海安人,工程师,从事励磁控制、风电控制和电力电子研究工作;

伍阳(1986),男,湖北荆州人,研究生,从事智能配电网、微电网研究工作;

刘皓明(1977),男,江苏东台人,副教授,从事智能配电网、微电网研究工作。

(下转第8页)

小波熵和BP神经网络在孤岛检测与扰动辨识中的应用

梁雪飞, 陈歆技

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:传统的孤岛检测在受到电网扰动时可能导致误判,从而将光伏系统切除,所以孤岛检测技术必须具备区分扰动与孤岛的能力。将小波变换的多分辨率分析与信息熵技术结合,提出基于小波熵和BP神经网络的孤岛检测技术,该检测技术在符合国际标准中对孤岛检测的标准要求的同时,能够有效区分电网扰动与孤岛现象的内在不同。仿真实验表明该方法具有较高的准确性。

关键词:孤岛;电压扰动;小波;多分辨率分析;熵;神经网络

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2012)03-0005-04

伴随着全球范围内的能源危机,新能源技术受到了世界各国更多的关注。风力发电、光伏发电等分布式电源(DG)接入系统可能引起的孤岛现象受到人们越来越多的重视,孤岛检测成为光伏系统并网所必须解决的一个技术问题^[1,2]。传统的孤岛检测技术主要检测电压与频率的波动;与被动检测法相比,主动检测法可以在降低检测盲区的同时,有效地判别孤岛的发生,但其向系统中注入的扰动变量对电能质量的影响不可忽视^[3];同时,电力系统中可能存在电压或频率波动、谐波或噪声等污染,这些因素给孤岛现象的检测带来了一定的困难^[4-8],因此,如何有效区分系统扰动与孤岛现象的发生成为孤岛检测检测技术的关键。

小波熵^[9,10]以其出色的信号分析与处理能力广泛地应用于电力系统的故障检测与诊断中。神经网络^[11,12]作为人工智能算法,其实质反映了输入转化为输出的一种数学表达式,能够通过对输入样本的训练,提取信号的特征,进而对输入的检测信号进行有效分类与辨识。以公共耦合点的电压作为采样信号,借助BP神经网络,通过小波熵值的变化对孤岛的发生进行有效检测,理论与仿真验证表明,该算法能够准确识别孤岛发生与电压扰动,从而避免光伏逆变器的误动作。

1 基于多分辨率分析的小波变换与小波熵

1.1 基于多分辨率分析的小波分解与重构

(1) 对长度为 N 的离散信号采用Mallat算法^[13]进行处理,将上一级信号通过高通滤波器 H_i_D 与低通滤波器 L_o_D 后,分别得到原信号的细节分量与近似分量,如式(1)所示;随后对信号的近似分量继续分解,再次通过高通、低通滤波器,这样,在选择合适的小波基函数与分解层数的基础上,原信

号经过尺度 $j=1,2,3,\dots,J$ (其中 J 为最大分解尺度)的分解,最终得到 $D_1,D_2,D_3,\dots,A_J$,其中 $D_1,D_2,D_3,\dots,D_{J-1}$ 与 A_J 分别表示信号的高频细节分量与低频近似分量。

$$\begin{cases} A_{j+1}=H_i_DA_j(k) \\ D_{j+1}=L_o_DA_j(k) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 对分解后的各层系数进行小波变换系数的重构,重构高通、低通滤波器系数分别为 $H_i^*_D$ 与 $L_o^*_D$ 。其中 $H_i^*_D$ 与 $L_o^*_D$ 分别是 H_i_D 与 L_o_D 的对偶算子。

$$A_{j-1}=H_i^*_D \times D_j + L_o^*_D \times A_j \quad (2)$$

上述即是基于多分辨率分析的小波分解与重构算法。

1.2 小波熵

熵是表征信息的一个普适量^[9],Shannon的信息熵理论指出,对于一个不确定的系统,若用一个取有限值的随机变量表示其状态特征,取值为 x_i 的概率 p_i 为:

$$p_i=p\{X=x_i\} \quad i=1,2,\dots,L \quad (3)$$

且 $\sum_{i=1}^L p_i=1$,则 X 的某一结果得到的信息可以用 $I_i=\log(1/p_i)$ 表示,于是, X 的信息熵可以表示为:

$$H(X)=-\sum_{i=1}^L p_i \log(p_i) \quad (4)$$

其中,当 $p_i=0$ 时, $p_i \log(p_i)=0$,信息熵 H 是在一定的状态下定位系统的一种信息测度,是对序列未知程度的一种度量,可以用来估计随机信号的复杂性。

1.3 小波熵的构造

就多尺度小波分解而言,在某一时间窗内,信号的总能量 P_{power} 等于各分量能量 P_{power}^j 之和,进而设 $p_j=P_{\text{power}}^j/P_{\text{power}}$,因有 $\sum_j p_j=1$,于是可定义小波熵

W_{EE} 为^[9]:

$$W_{EE} = - \sum_j p_j \log(p_i) \quad (5)$$

其中, $P_{power}^j = \sum_j |D_j(k)|$, k 为时间序列, $k=1, 2, \dots, N$, N 为采样信号采样点数。

2 BP 神经网络

BP 神经网络, 即误差反向传播算法的学习过程, 由信息的正向传播和误差的反向传播 2 个过程组成。BP 神经网络的出现成功解决了求解非线性连续函数多层前馈神经网络权重调整问题, 广泛应用于函数逼近、模式识别 / 分类等领域。

BP 神经网络的节点输出模型如式(6)和式(7)所示。隐层节点输出模型为:

$$Q_j = f(\sum W_{ij} \times X_i - q_j) \quad (6)$$

输出层节点输出模型为:

$$Y_k = f(\sum T_{jk} \times Q_j - q_k) \quad (7)$$

式中: f 为非线性作用函数; q 为神经单元阈值。典型 BP 网络结构模型如图 1 所示。

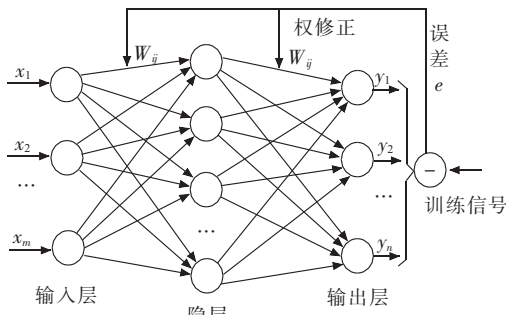


图 1 BP 神经网络结构模型

3 基于小波熵与 BP 神经网络的孤岛检测与扰动辨识

考虑到孤岛现象的发生往往伴随着电压幅值或频率的变化, 因此基于小波熵与 BP 神经网络的孤岛检测技术的基本原理是根据光伏电源与本地负载的公共耦合点的采样电压在故障前后的变化来判别当前运行状态。将公共耦合点的采样电压经小波分解与系数重构后, 计算其各层系数的小波熵值^[14,15], 并以此作为 BP 神经网络的输入值, 经神经网络系统处理判别后确定当前电力系统所处的运行状态, 进而控制相应的保护装置是否将光伏系统切除。

文中采样电压信号选自光伏系统与本地负载

连接的公共耦合点处, 为保证采样信号的准确性, 采样频率为 6 400 Hz, 即每周波 1 280 点的采样速率, 经小波变换系数分解与重构后, 并根据式(5), 分别计算其各层系数的小波熵, 此后, 将计算出的小波熵值作为神经网络的输入, 用于判断当前系统所处运行状态。文中选择 db6 小波对采样信号进行小波分解与重构; 神经网络采用三层 BP 网络, 训练函数选择 tansig 函数。根据设计的需要, 输入层为 6 个输入单元, 输出层 1 个输出单元, 而隐层节点个数根据经验公式(8)^[16]选择为 12 个。

$$n = \sqrt{n_i + n_o} + a \quad (8)$$

式中: n 为隐层节点个数; n_i 为输入节点数; n_o 为输出节点数; a 为 1~10 之间的任意常数。

文中主要目的在于将电网电压扰动与孤岛现象的出现进行有效辨识, 以避免光伏并网逆变器的误动作。由于要区分的只是两类情况, 而 BP 神经网络的输出值可以限定在 (-1, 1) 范围内, 这样通过给定相应的训练数据 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$, 使得 $y_i = -1$ 表示电网电压扰动 (非孤岛), $y_i = 1$ 表示孤岛发生。

4 仿真实验与数据分析

4.1 光伏模型及仿真实验

通过 Matlab/Simulink 对 4 kW 单向光伏并网系统进行建模仿真, 电网电压的有效值为 220 V, 负载品质因数以 $Q_f = 2.5$ 为例, 谐振频率为 50 Hz, 如图 2 所示。

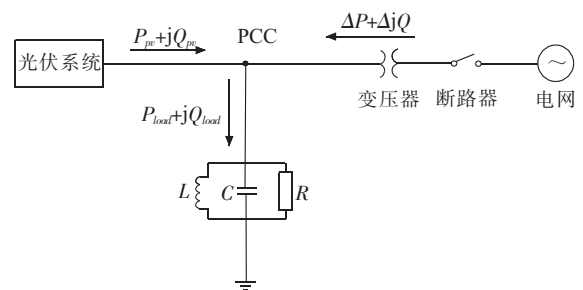


图 2 单向光伏并网系统

仿真中以断路器在 0.08 s 断开模拟孤岛现象的发生; 为电网电压施加的扰动时间为 0.08~0.14 s, 持续 3 个周期共 0.06 s。

以公共耦合点的电压作为采样信号, 每周波 128 个采样点, 采样频率为 6 400 Hz, 仿真时间为 0.2 s, 共 1 280 个采样点。对采样信号采用 db6 小波进行 6 层分解。针对两类情况 4 种信号 (电压暂升与暂降、孤岛压降与压升), 分别选取 40 个样本作为 BP 神经网络的训练数据, 然后选取 60 个样本进行测试。

4.2 数据分析

4.2.1 采样信号的小波熵值

对孤岛后电压升高与降低、电网扰动所致的电压暂升与暂降 4 种信号进行小波分解与系数重构,分别选取 40 组数据作为 BP 神经网络训练数据输入。4 种情况下部分小波熵值如表 1 所示(以电压暂升和暂降 10%,孤岛后电压升高和降低 10%为例)。

表 1 两类信号的小波熵值表

电压变化率 /%		公共耦合点					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
扰动 压升	10	5.609 7	2.188 8	3.413 9	3.322 5	6.756 7	6.863 1
	20	5.641 2	2.308 8	3.610 7	3.456 3	6.749 5	6.850 5
	30	5.651 3	2.429 4	3.781 4	3.591 8	6.738 0	6.836 0
扰动 压降	10	5.493 4	2.156 1	3.413 4	3.316 8	6.745 7	6.867 0
	20	5.437 3	2.240 6	3.610 1	3.443 9	6.724 7	6.856 1
	30	5.381 4	2.333 1	3.781 6	3.574 3	6.699 6	6.839 3
孤岛 压升	10	5.607 6	2.135 8	3.341 0	3.281 4	6.766 3	6.868 1
	20	5.594 8	2.073 7	3.276 9	3.344 7	6.760 6	6.859 2
	30	5.618 1	2.038 4	3.260 5	3.349 6	6.755 9	6.854 4
孤岛 压降	10	5.538 4	2.289 0	3.400 6	3.193 4	6.740 9	6.852 2
	20	5.599 6	2.378 3	3.416 4	3.155 8	6.716 8	6.833 3
	30	5.495 8	2.448 3	3.439 3	3.101 5	6.670 9	6.797 3

对表 1 中的小波熵值进行分析,可以看出:同类样本(孤岛后电压升高与降低、电网扰动所致电压暂升与暂降)之间小波熵值的变化趋势非常相似;不同类样本(孤岛与非孤岛)之间,小波熵值存在一定不同,但差异不大。由此需要借助 BP 神经网络来辨识 2 类情况下小波熵值的内在特征,从而有效实现区分孤岛与非孤岛状态的目的。

4.2.2 算例测试

针对训练好的 BP 神经网络,选取 2 类信号共 60 组数据作为测试数据来验证所提出算法的准确性。测试结果如表 2 所示(选取其中的 12 组列表)。

表 2 BP 神经网络测试结果

样本	耦合点 电压	变化 率/%	测试结果	目标输出
电网 扰动	暂升	5	-0.999 12	-1
		18	-0.999 70	-1
		28	-0.999 88	-1
	暂降	5	-0.989 91	-1
		18	-0.999 76	-1
		28	-0.999 65	-1
孤岛	上升	18	0.987 28	1
		25	1.000 00	1
		32	0.999 45	1
	下降	18	0.907 84	1
		25	0.997 34	1
		32	0.997 34	1

表 2 中 BP 神经网络的测试结果与目标输出误差相对较小,可以准确有效地将孤岛与扰动区分。

4.2.3 噪声测试

电力系统测试中不可避免的会受到噪声的影响,因此在进行孤岛与扰动区分时必须将噪声污染加以考虑。在采样信号中加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声,选取 30 组测试数据再次进行孤岛与扰动的辨识。受篇幅限制,表 3 只列出其中的 8 组数据。

表 3 BP 神经网络噪声测试结果

样本	耦合点 电压	变化 率/%	测试结果	目标输出
电网 扰动	暂升	17	-0.999 81	-1
		28	-0.999 88	-1
	暂降	17	-0.999 83	-1
		28	-0.999 65	-1
孤岛	上升	17	0.992 13	1
		28	0.987 54	1
	下降	17	0.995 55	1
		28	0.999 44	1

添加噪声后,各组信号的各层熵值发生明显变化,但仍然保持表 1 所描述的特性,并没有影响最终的测试结果。因此该算法具有较高的准确性。

5 结束语

文中将小波熵与 BP 神经网络结合起来,作为光伏并网系统的一种孤岛检测技术。选取公共耦合点的电压作为参考输入,进行小波变换与系数重构后,计算每一层系数的小波熵,以此作为 BP 神经网络的训练输入。仿真算例表明,该设计方案能够有效地区分孤岛与扰动,进而避免光伏并网逆变器的误动作。

参考文献:

[1] IEEE Std 929—2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems[S].

[2] 曹海燕,田悦欣.并网逆变器孤岛控制技术[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):72-74.

[3] 郭小强,赵清林,邹伟扬.光伏并网发电系统孤岛检测技术[J].电工技术,2007,22(4):157-162.

[4] 禹华军,潘俊民.无功补偿技术在光伏并网发电系统孤岛检测中的应用[J].电工电能新技术,2005,24(3):22-26.

[5] 刘芙蓉,康 勇,段善旭,等.主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J].中国电机工程学报,2008,28(1):95-99.

[6] 李 军,黄学良,陈小虎,等.基于分压器原理的孤岛检测技术在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(34):15-21.

[7] 李春玲.基于光伏并网发电系统的孤岛检测[D].天津:天津大学,2008.

[8] PIGAZO A, LISERRE M, MASTROMAURO R A, et al. Wavelet-based Islanding Detection in Grid-connected PV Systems

[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(11):4445-4455.

[9] 何正友,刘志刚,钱清泉.小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探讨[J].电网技术,2004,28(21):17-21.

[10] 刘瑞叶,龙志刚.小波熵及小波变换的短期负荷预报[J].哈尔滨理工大学学报,2007,12(4):62-65.

[11] 丛 爽.面向 Matlab 工具箱的神经网络理论与应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

[12] 侯媛彬,杜京义,汪 梅.神经网络[M].陕西:西安电子科技大学出版社,2007.

[13] 郭 晶,孙伟娟.小波分析理论与 matlab7 实现[M].北京:电子工业出版社,2005.

[14] 朱艳伟,石新春,李 鹏.分辨奇异谱熵和支持向量机在孤

岛与扰动识别中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(7):64-70.

[15] 何正友,钱清泉.多分辨信息熵的计算及在故障检测中的应用[J].电力自动化设备,2001,21(5):9-11.

[16] 周开利,康耀红.神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M].北京:清华大学出版社,2009.

作者简介:
梁雪飞(1986),男,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用、新能源发电技术(光伏);
陈歆技(1965),男,上海人,副教授,从事电力系统配网自动化、网络及通信技术、新能源及节能技术、电力电子技术等研究工作。

Applications of Wavelet Entropy and BP Neural Network
in Islanding Detection and Disturbance Identification

LIANG Xue-fei, CHEN Xin-ji

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Traditional islanding detection methods may have erroneous judgment influenced by grid disturbance, and thus would lead to photovoltaic system isolation. So islanding detection technology must have the ability to distinguish the disturbance and islanding. Combined the multiresolution analysis of wavelet transform and information entropy, a novel islanding detection method based on the wavelet entropy and BP neural network is proposed. The detection method in accord with the requirement of islanding detection technology in international standards, and can effectively distinguish the inner difference of grid disturbance and islanding phenomenon Simulation results show that the presented islanding detection method has a high accuracy.

Key words: islanding; voltage disturbance; wavelet; multiresolution analysis; entropy; neural network

(上接第 4 页)

Research on Active Power Difference Balancing of Autonomous Operation Microgrid

SHI Lei¹, WU Yang², LIU Hao-ming²

(1.NARI Technology Development Co.Ltd., Nanjing 210061, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In autonomous operation microgrid, due to the peak and valley load difference characteristics and the existence of distributed power, the active power difference has great fluctuation, which is not conducive to the stability and economy of reserve power operation. Through using reasonable allocation of energy storage device and effective charge-discharge strategy, the frequency of microgrid can keep in a reasonable range under the premise of the smooth output of reserve power. Take this as target, a mathematics model of active power difference minimum fluctuation in autonomous operation microgrid is established in the paper. And the state of charge (SOC), the charge-discharge efficiency and the cycle control of the energy device are also considered in the model. The problem was solved through dynamic programming algorithm. At last, the effectiveness of the proposed model and the applicability of the dynamic programming algorithm are verified through example simulation analysis.

Key words: microgrid; autonomous operation; active power difference; energy storage device; dynamic programming

欢迎投稿 欢迎订阅

UHVDC 多信号直流调制提高系统暂态稳定性的研究

严 栋¹, 蒋 平¹, 刘建坤², 赵静波²

(1.东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:特高压直流输电(UHVDC)输电容量大、控制灵活迅速,在我国“西电东送”战略中扮演了重要角色。在传统的直流调制基础上提出了多种信号综合调制的方法,并采用极点配置法整定控制器参数。通过 PSCAD/EMTDC 软件对锦屏-苏南特高压接入江苏电网进行了仿真研究,结果表明,多信号直流调制能进一步有效提高交流系统的暂态稳定性,取得较好的控制效果。

关键词:特高压直流;暂态稳定;直流调制;PSCAD/EMTDC 仿真

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2012)03-0009-04

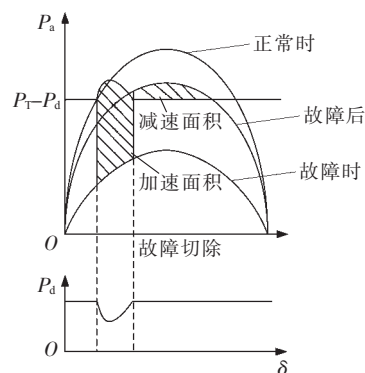
我国能源和负荷的地理分布不均,决定了我国要解决电力供应的问题,就必须充分发挥电网的互补调剂及区域负荷错峰作用^[1]。特高压直流输电(UHVDC)是 ± 500 kV 高压直流(HVDC)之上采用更高一级电压等级(± 800 kV)的直流输电技术。其电压等级更高、传输功率更大,能更大地降低线路损耗。但 UHVDC 的性能极大地依赖于控制系统^[2]。制定一个可行、可靠的控制策略十分重要而且必要。综合目前交直流互联系统的暂态稳定控制策略,UHVDC 的直流调制得到了极大关注。文献[3]研究了交直流混联系统的直流快速调制对暂态稳定的贡献。文献[4]提出了一种 HVDC 暂态稳定控制策略参与交直流并联系统的功率调节。文献[5]研究了交直流互联电网直流功率调制相关问题,包括直流功率调制信号的选择、直流调制控制器的设计及其参数协调优化等。文献[6]采用双侧频率调制改善送端交直流系统的暂态稳定性。文献[7]研究了直流系统在一定的控制方式下,调制增益的变化对系统暂态稳定裕度及直流系统的影响。然而,传统的直流调制一般仅采用单个控制信号进行调制,网络规模较大时,调制效果可能不能令人满意。文中在 UHVDC 基本控制功能的基础上,制定附加控制策略,设计了多信号直流调制控制器并采用极点配置法整定控制器参数。通过在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立电磁暂态仿真模型,验证了 UHVDC 提高交流系统暂态稳定性的效果。

1 直流调制基本原理

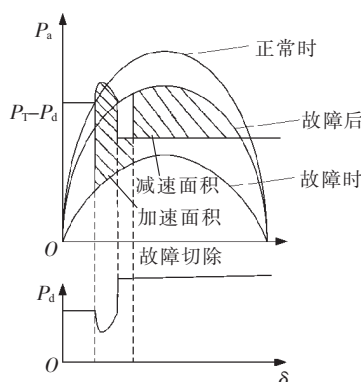
直流功率调制^[8]的原理是在已有的直流输电控制系统中加入附加的直流调制器,从交流系统中提取反映系统异常的信号,调节直流输电线路传输功率,使之快速吸收或补偿其所连交流系统中的功

率过剩或缺额,起到紧急支援和阻尼振荡的作用。

UHVDC 的直流调制提高系统稳定性的作用可用图 1 所示的等面积法则说明。



(a) 未采用直流调制的交流系统功角特性



(b) 采用直流调制后的交流系统功角特性

图 1 UHVDC 直流调制提高系统稳定性的作用

未采用直流调制的交流系统功角特性如图 1 (a)所示,直流功率在故障后仅恢复故障前水平,交流系统获得的减速能量无明显增加,系统有可能失稳。而采用直流功率调制后的交流系统功角特性如图 1(b)所示,直流功率在故障后通过调制功能提升了传输的直流功率,使交流系统获得的减速能量增加,交流系统保持稳定的可能性大大增加。

好的调制效果要求所选取的调制信号中必须包含系统的被控模态。在某些情况下,为获得好的调制

效果,所选取的调制信号应由反映系统实时状态的信号组成,而不应只局限于某一个信号。直流功率调制可选用下列参数作为输入信号。

(1) 发电机角频率调制。研究表明,直流功率的变化可由某台发电机的角速度变化量 $\Delta\omega$ 决定。

(2) 双侧频率功率调制。频率是表征系统有功功率是否平衡的一个关键量^[6]。当系统发生故障(如短路、断线)后,有功功率将无法保持平衡,从而引起系统频率的变化。

(3) 交流线功率信号调制。正常运行时,系统的潮流一般不会发生明显变化;而当发生故障时,系统潮流会发生重新分配,交流线路上传输的功率会有剧烈变化。

以上各单信号调制各有优缺点。为充分发挥各信号的优势,取得更好的控制效果,采用多信号直流控制器,将上述单信号进行加权综合。

2 直流调制控制器设计

2.1 单信号控制器设计及参数整定

对采用不同调制信号的直流调制控制器进行设计和参数整定时,采用极点配置的方法。在交直流系统中,以直流电流整定值增量 ΔI 作为控制变量,附加控制的调制信号为被控变量 ΔX (即直流调制的调制信号)。则 ΔI 到 ΔX 的开环传递函数 $G(s)$ 框图如图 2(a)所示。引入 ΔX 作为反馈变量,系统闭环传递函数 $G_c(s)$ 框图如图 2(b)所示。

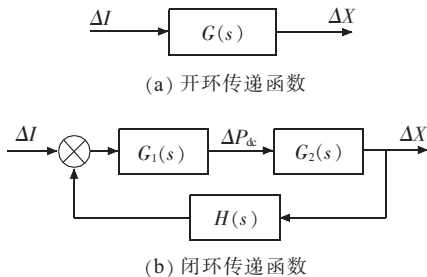


图 2 系统传递函数框图

系统的闭环传递函数为：

$$G_c(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta I(s)} = \frac{G(s)}{1 - G(s)H(s)} \quad (1)$$

其中： $G(s) = G_1(s)G_2(s)$ 。

由上式可知,闭环系统的特征方程为：

$$1 - G(s)H(s) = 0 \quad (2)$$

假设加入反馈补偿环节后闭环系统的期望主导极点为 s_d ,则有：

$$H(s_d) = \frac{1}{G(s_d)} \quad (3)$$

因此 $H(s)$ 在 $s = s_d$ 处的幅值和相角可通过系统开环传递函数 $G(s)$ 在 $s = s_d$ 处的幅值和相角求得。

根据该结果可求出相应于期望主导节点的直流调制器的补偿幅值与相位,整定调制器参数。

系统开环传递函数可利用测试信号法^[9]来拟合。首先在电流附加控制环节上施加一系列小信号振荡电流。对系统进行机电暂态仿真直至达到稳态,提取公共周期内的数据 ΔI_{test} 和 ΔX 。进行傅里叶分解,得到不同频率下的相量 $\Delta \dot{I}_{\text{test}}(k\omega_0)$ 和 $\Delta \dot{X}(k\omega_0)$ 。对所有的 $k\omega_0$ 计算在此频率下的传递函数：

$$G(k\omega_0) = \frac{\Delta \dot{X}(k\omega_0)}{\Delta \dot{I}_{\text{test}}(k\omega_0)} \quad (4)$$

最后通过拟合得出 $G(s)$ 的解析表达式。

在求得系统开环传递函数表达式后,即可求出系统区域间振荡模式的频率和阻尼比,选择期望的主导极点。从而求出直流调制器的补偿幅值和相位,整定控制器参数。

设计的功率调制器如图 3 所示。包含隔直环节、比例放大环节、1~3 阶的超前-滞后环节、限幅环节。

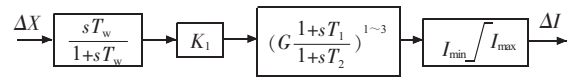


图 3 功率调制器控制框图

隔直环节中, T_w 通常取 10 s, 目的是将输入信号中的直流成分滤除。比例放大环节和超前-滞后环节的参数根据前述的测试信号法进行整定,限幅环节一般取 $-50\% \sim 50\%$ 。

2.2 多信号控制器的设计

多信号控制器采用加权综合的方法。权值分配通过每组单信号控制增益调节实现。控制框图如图 4 所示。其中,各通道的参数可通过上节中的测试信号法进行整定, $K_1 \sim K_3$ 联合运行参数的选取可通过多次仿真确定最佳参数配置。

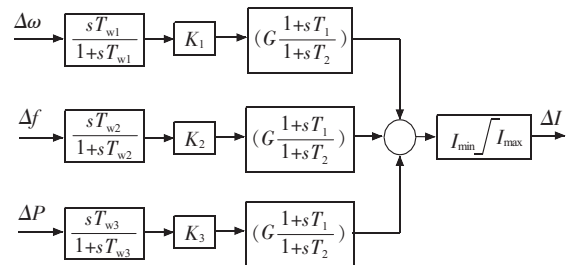


图 4 多信号控制器框图

发电机的角频率信号对于发电机功角摆动具有良好的模态可观性和可靠性,因此与另 2 种调制信号相比,引入发电机的角频率信号对减弱功角摇摆以及防止转子失步具有更好的效果。但该调制方法仅反映局部的运行状态,具有一定的局限性。

引入换流站两侧的频差信号在提高交流稳定

性和阻尼振荡也能够收到较好的效果,且能即时反映整个网络的频率状况,对整个网络有较好的监测与控制作用。不过母线频率信号需要通过锁相环间接测量,其测量过程中会产生一定的误差,并可能会受到谐波以及电网其他扰动的影响,且测量器件的参数对调制效果也有一定的影响。

引入交流线上传输功率信号在提高交流稳定方面的作用并不如上述 2 种信号明显,但功率信号的测量简单,成本较低,在规模不大的网络中引入重要交流联络线的功率作为调制信号也有一定意义。

事实上,在广域测量系统中,发电机角速度信号可以取多台重要发电机的角速度,交流线功率变化量信号可以取多条重要联络线的功率变化。在发生故障时,通过系统电气量变化估算故障的距离,动态调节多信号权值,改变 UHVDC 的电流指令,给予系统功率支援,提高系统暂态稳定性。

3 直流调制控制器的仿真

锦屏—苏南特高压直流工程^[10]预计将在 2012 年建成投运。届时将有 7 200 MW 电能从四川水电基地送至江苏电网,对江苏电网的运行方式和稳定性将带来重大影响。为验证直流调制控制器在实际电网中的作用,通过 PSCAD/EMTDC 软件建立含直流调制控制器的 UHVDC 仿真模型及江苏电网等值模型,进行仿真研究。

3.1 模型建立

在 PSCAD/EMTDC 环境中建立一个双 12 脉动阀组串联接线的 7 200 MW 特高压直流输电模型。送电端采用交流电源模型,即为一无穷大电网;受电端采用江苏交流网等值模型,如图 5 所示。

基本控制系统采用 CIGRE 标准测试系统^[11],整流侧由定电流控制和最小触发角限制组成;逆变侧配有定电流控制和定关断角控制,但无定电压控制。此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流环节(VDCOL),可以减小换相失败的可能性,并降低直流功率同时减小对交流系统无功的需求,逆变侧还配有电流偏差控制(CEC)。

该仿真系统中,附加阻尼控制系统采用三通道信号调制,分别为谏壁电厂发电机角频率信号、UHVDC 两侧交流系统频率差信号和过江断面功率变化信号作为直流调制的控制信号。

3.2 仿真结果分析

在江苏电网晋陵节点设置一个时长 0.1 s 的金属性瞬时三相短路的大扰动,对 UHVDC 的直流调制进行仿真比较。故障后谏壁电厂发电机功角(取对沙洲电厂发电机的相对功角)摇摆曲线图 6 所示。

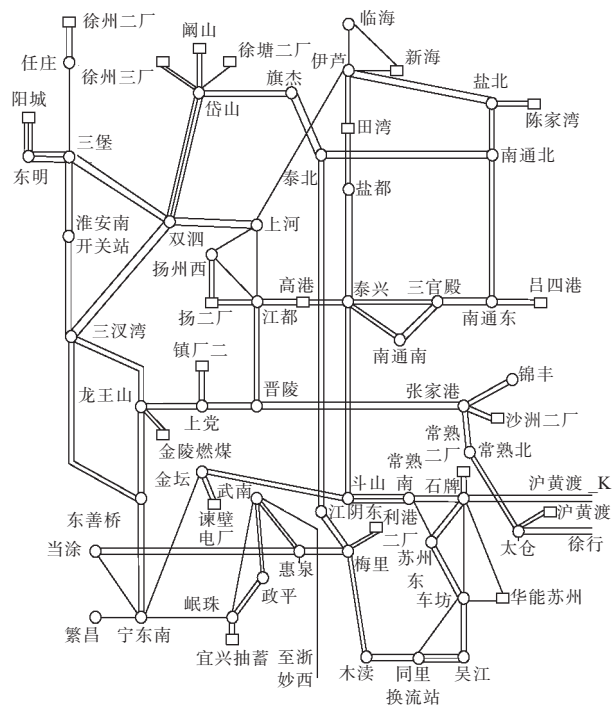
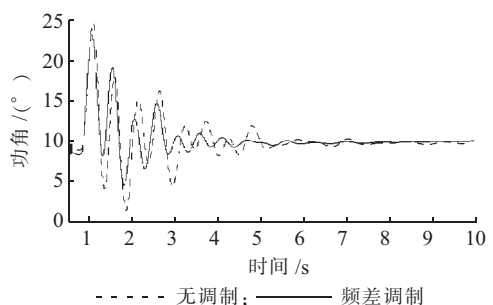
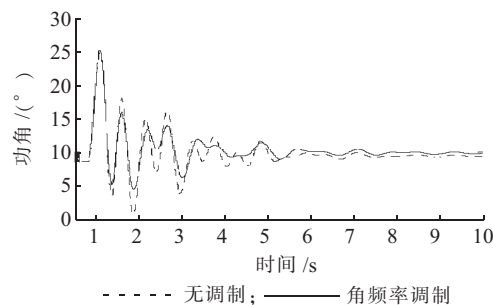


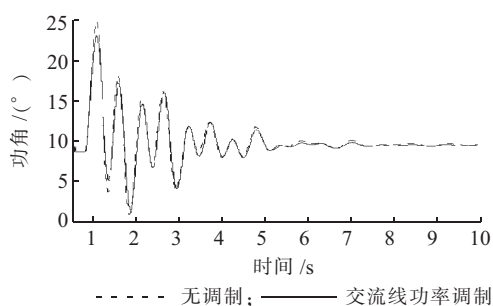
图 5 等值江苏交流网



(a) 频差调制效果



(b) 角频率调制效果



(c) 交流线功率信号调制效果

图 6 江苏网直流调制下晋陵 0.1 s 三相短路后谏壁电厂发电机功角摇摆曲线

可见,加入直流功率调制后,谏壁电厂的发电机

功角摇摆衰减速度均有不同程度的提高。UHVDC 的直流功率调制对江苏电网暂态稳定性的提高有一定作用。

3 种调制信号各有优缺点。将 3 种调制信号进行加权综合输出的调制信号,既能反映全网的运行状况,也反映重要发电机的功角变化,具有更好的调制效果。

采用 3 种信号加权综合调制后($K_1=1.6, K_2=0.5, K_3=0.2$),调制效果如图 7 所示,谏壁电厂的发电机功角第一摆有了更明显的下降,达到稳态的时间也有缩短,提高了交流系统的暂态稳定性。

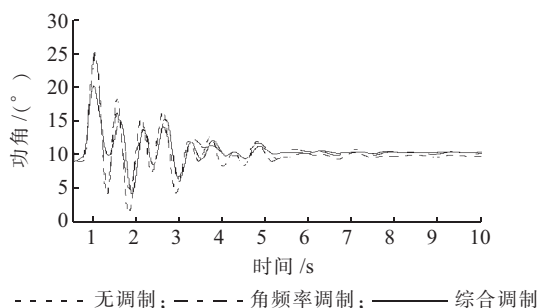


图 7 综合调制下晋陵 0.1 s 的金属性三相短路后谏壁电厂发电机功角摇摆曲线

4 结束语

文中主要研究了直流调制器的设计与基于极点配置法的控制器参数整定,提出了多信号综合调制的直流调制方法。通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,对锦屏—苏南特高压直流输电工程接入江苏交流网进行了仿真。仿真结果表明,文中设计的直流调制控制器能够有效地提高交直流互联系统中交流系统的暂态稳定性,减弱故障后发电机功角摇摆。采用多种信号综合调制的控制方法能够发挥各种信号的优势,具有更好的调制效果。

参考文献:

- [1] 董 凌. 特高压直流输电对受端交流系统稳定影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [2] 韩民晓, 文 俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] RAHMAN H, KHAN B H. Stability Improvement of Power System by Simultaneous AC - DC Power Transmission[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 756-764.
- [4] HAMMAD A E. Stability and Control of HVDC and AC Transmissions in Parallel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1545-1554.
- [5] 谢惠藩, 张 尧, 夏成军, 等. 交直流互联电网直流功率调制相关问题[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 43-50.
- [6] 陈汉雄, 莫 骏. 双侧频率调制改善特高压直流输电系统暂态稳定性研究[J]. 中国电力, 2009, 42(2): 34-38.
- [7] 束洪春, 董 俊, 孙士云, 等. 直流调制对南方电网交直流混联输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 29-33.
- [8] 刘振亚. 特高压直流输电理论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [9] 徐 政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 朱艺颖, 芮 虎, 李新年, 等. 锦屏—苏南特高压直流输电工程直流线路电磁暂态仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 1-4.
- [11] 杨汾艳, 徐 政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.

作者简介:

- 严 栋(1987), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行控制;
- 蒋 平(1954), 男, 江苏溧阳人, 博士生导师, 从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用方面研究;
- 刘建坤(1980), 男, 山东潍坊人, 工程师, 从事电力系统计算和分析工作;
- 赵静波(1982), 男, 重庆人, 工程师, 从事电力系统计算和分析工作。

Research on the Multi-signal Comprehensive DC Modulation of UHVDC in Improving System Transient Stability

YAN Dong¹, JIANG Ping¹, LIU Jian-kun², ZHAO Jing-bo²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 21103, China)

Abstract: The ultra-high voltage DC (UHVDC) transmission, which has great transmission capability and can be controlled flexibly and quickly, plays an important role in the power transmission from western china to the eastern china. Based on the traditional DC modulation methods, a comprehensive modulation method with many kinds of signals is proposed in the paper. Besides, the controller parameters are set by pole assignment. The simulation analysis of Jiangsu power grid with Jinping-Sunan UHVDC integration based on PSCAD/EMTDC is carried on, and the results show that the multi-signal comprehensive DC modulation can further improve the power system transient stability and obtain better control effect.

Key words: ultra-high voltage DC (HVDC); transient stability; DC modulation; PSCAD/EMTDC simulation

一起电容器断线故障后的保护动作情况分析

潘晓明, 汤 峻, 陈 俊, 戴宁迎
(苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要: 分析了某 110 kV 变电站 10 kV 电容器 C 相断线故障后电容器不平衡电压保护未动作情况, 讨论了电容器单星形接线方式下不平衡电压保护存在的问题, 建议可通过增加电流判据, 来防止类似问题出现的情况。

关键词: 不平衡电压保护; 电工原理; 电流判据

中图分类号: TM53; TM772

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)03-0013-02

10 kV 电容器组采用单星形接线的情况较多, 一般采用电容器不平衡电压保护。在某些情况下, 电容器不平衡电压保护将无法对电容器异常情况作出正确判断。

1 故障情况

2010 年 11 月 16 日苏州市区某 110 kV 变电站内第一组电容器运行中突然出现 C 相电流消失。二次检修人员现场检查发现, 后台机 C 相电流遥测为 0, 保护装置上 C 相电流为 0, 开关柜上三相电流表中 C 相电流指示亦为 0, 但保护装置运行正常, 无电容器不平衡电压保护未动作的告警信息。根据现场情况判断为 C 相一次回路上存在问题。将电容器停电检查, 发现在 C 相电容器组与电抗器之间出现导线断裂情况。由于 C 相一次回路断开, 造成 C 相电流消失。一般说来, 由于 C 相电压消失, 电容器不平衡保护应该会动作跳开电容器组的断路器。

2 情况分析

该电容器组为单星型接线方式(如图 1 所示), 电容器容量为 4 800 kvar, 单节容量为 200 kvar, 每相 8 只并接, 设不平衡电压保护(整定: $\Delta U=5\text{ V}$, $t=0.2\text{ s}$), 不平衡电压取单相电容器两端放电 PT 开口三角组成的零序电压 ΔU 。正常情况下:

$$\Delta U = U_A + U_B + U_C \approx 0 \quad (1)$$

如果按常规考虑, 当 C 相出现一次断线后, U_C 为 0, 则此时开口三角输出电压 ΔU 应该为:

$$\Delta U = U_A + U_B \approx 100\text{ V} \quad (2)$$

电容器不平衡保护应该可靠动作。可是实际电容器保护未动作。

针对上述情况, 对电容器保护不平衡电压二次回路进行检查及试验。(1) 对电容器保护装置进行试验检查, 零漂及采样均满足要求, 保护动作情况

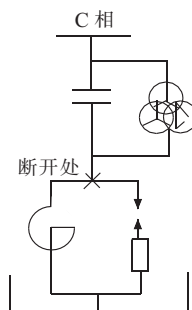


图 1 电容器单相接线

正确, 定值满足要求, 整组传动正确, 因此保护装置不存在问题。(2) 对电容器组至 10 kV 开关柜的二次回路进行检查核对, 接线均正确, PT 二次接地符合要求, 因此电容器至 10 kV 开关柜二次回路不存在问题。(3) 对电容器组放电 PT 之间的二次接线进行检查, 二次接线均正确, 无错、漏接线。

排除装置及回路问题后, 重新对系统发生故障时的情况进行了分析, 发现当电容器 C 相出现断开后(如图 2 所示), 分布在电容器 A, B 两相上的电压并未像初期认为的正常相电压而是发生了变化。根据电路原理^[1], 分析电容器 C 相一次连接断开后的等效电路(如图 3 所示)。

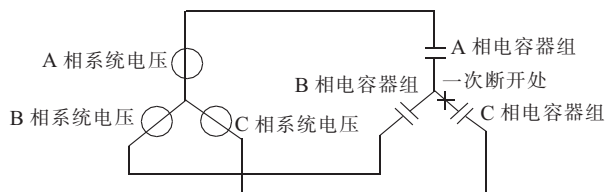


图 2 电容器 C 相一次连接断开后的系统示意图

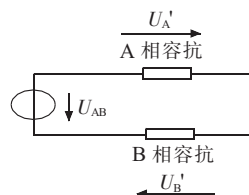


图 3 电容器 C 相一次连接断开后的等效电路

(1) 正常情况下, 放电 PT 上 A, B, C 三相电压为系统额定相电压在电容器及电抗器上的分压, 由

于三相对称仅有少量的不平衡电压产生,可认为开口三角输出电压 ΔU 为:

$$\Delta U=U_a+U_b+U_c \approx 0 \tag{3}$$

(2) C 相一次发生断线后分配在 A,B 两相上的一次电压为:

$$\begin{cases} U_A'=U_{AB}\times Z_A/(Z_A+Z_B) \\ U_B'=U_{AB}\times Z_B/(Z_A+Z_B) \end{cases} \tag{4}$$

通过放电 PT 反应到二次的电压为:

$$\begin{cases} U_a=0.5U_A'/K \\ U_b=-0.5U_B'/K \\ U_c=0 \end{cases} \tag{5}$$

式中:K 为 PT 变比。开口三角输出电压 ΔU 为:

$$\Delta U=U_a+U_b+U_c=0.5 U_A'/K-0.5 U_B'/K+0 \approx 0 \tag{6}$$

故电容器不平衡电压保护不动作。同时可知,A,B 两相电压在 C 相接线断开之前与之后其相电压幅值与电容器中性点都发生了变化,其中相电压近似为原来的 $\sqrt{3}/2$,中性点 N 点变化至 N' 点,如图 4 所示。

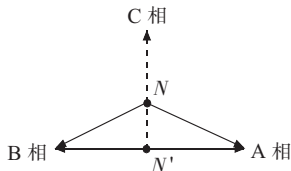


图 4 电容器 C 相断线后电容器中性点发生偏移

(3) 为了进一步确认分析正确性,通过监控系统录波对故障前后的测量电流流量进行了比较,故障前 A,B,C 三相电流大小为 240 A 左右 (如图 5 所示),故障后 C 相电流降为 0,A,B 两相电流变为 210 A 左右(如图 6 所示),由于各相容抗接近相等,而且故障前后容抗不会发生变化,因此可认为加在 A,B 两相上的电压发生了变化,变为原来的 $210/240=0.875$ 倍,与分析中 A,B 相电压为 $\sqrt{3}/2=0.866$ 的相电压几乎相等。考虑容抗不可能完全相同的情况,因此当 C 相发生断开后,A,B 两相电压变为接近原来的 0.866 倍,电容器中性点偏移至 AB

相电压连线中点处。

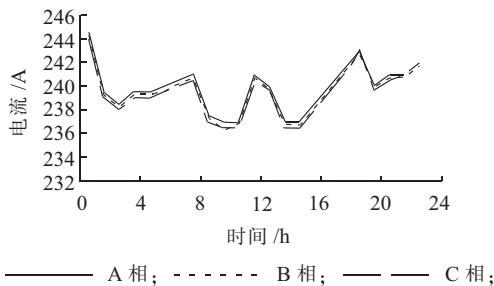


图 5 电容器故障前电流情况

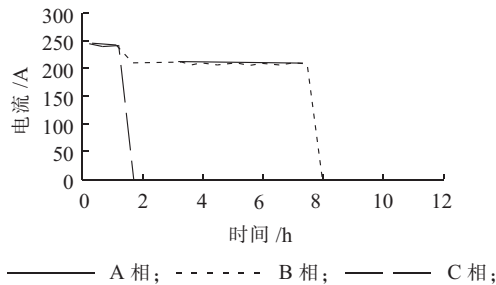


图 6 电容器 C 相断线故障后电流情况

3 结束语

善于运用电工原理来分析现场发生的异常情况,往往能起到事半功倍的效果。另外单星形接线的电容器组在电力系统中使用很多,但大部分电容器保护不设电流断线判据。因此建议在电容器保护中增加 CT 断线判据,及时发现类似异常情况,保证系统安全稳定运行。

参考文献:

[1] 国家电网公司.继电保护培训教材[M].北京:中国电力出版社,2009.

作者简介:

- 潘晓明(1977),男,江苏苏州人,工程师,从事变电二次检修工作;
汤 峻(1976),男,江苏苏州人,高级工程师,从事变电检修管理工作;
陈 俊(1978),男,江苏南通人,工程师,从事变电检修管理工作;
戴宁迎(1978),男,上海人,工程师,从事变电二次检修工作。

Analysis of Protection Operation Behavior after an Accident of Capacitor Wire Breakoff Fault

PAN Xiao-ming, TANG Jun, CHEN Jun, DAI Ning-ying
(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: In the paper, the nooperation behavior of unbalance voltage protection after C phase wire breakoff fault on 10 kV capacitor in a 110 kV substation is analyzed. And the existing problems of unbalance voltage protection in the single star connection way of capacitor are discussed. Furthermore, in order to prevent such similar problems, it is suggested to add the current criterion.

Key words: unbalance voltage protection; capacitor; current criterion

几起电容式电压互感器故障分析

张春燕^{1,2}

(1.华北电力大学,北京 102206;2.扬州供电公司,江苏 扬州 225009)

摘 要:介绍了电容式电压互感器二次电压异常升高、电磁单元发热等几起典型故障,结合试验和解体检查结果,分析了产生故障的原因,提出相应的处理对策,并指出二次电压监视和红外测温是诊断电容式电压互感器健康状况的有效手段,可在运行中进一步积累经验。

关键词:电容式电压互感器;故障;分析

中图分类号:TM451 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2012)03-0015-02

电容式电压互感器与电磁式电压互感器相比具有绝缘性能好、耐压水平高、不易与断路器断口电容产生谐振、生产成本低、可兼作高频通信等诸多优点,在高压电网中使用的范围很广。扬州地区 110 kV 以上电压互感器中电容式电压互感器的使用比例达到 75%。其运行可靠性虽相对较高,但在运行中也曾发生故障,文中对 3 起不同类型的电容式电压互感器故障实例进行分析以供参考。

1 二次电压异常升高

1.1 故障概况

2010 年 5 月某变电站 110 kV 正母压变发生二次电压不平衡故障,该压变为电容式电压互感器,型号为 WVB110-20H。故障时二次电压分别为:A 相 77.8 V,B 相 66.55 V,C 相 66.54 V。A 相电压较 B,C 相增高 17%,现场检查该互感器无渗油及异常响声,初步分析 A 相电容单元内部故障。

1.2 诊断试验

对故障设备隔离后使用自激法进行了诊断试验^[1],结果及上次试验数据如表 1 所示。故障后 C₁ 电容量与介损均增大,电容量与铭牌值相比增大 7.2%(规程要求电容量≤±2%,介损<0.5%),C₂ 正常。由此分析,C₁ 内部有电容屏击穿导致电容量增大,中间压变的一次电压 $U_{c2}=U\times C_1/(C_1+C_2)$ 也随之增大,这与现场二次电压上升的现象是一致的。

表 1 电容量及介损试验数据

测试部位	铭牌电容量 /PF	故障后试验		上次例行试验	
		电容量 /PF	介损 /%	电容量 /PF	介损 /%
C ₁	28 132.6	32 150	1.2	28 280	0.04
C ₂	66 933.4	67 465	0.05	67 480	0.04

1.3 解体检查

对该电容式电压互感器解体发现,电容约 1/3

电容屏露出油面暴露在空气中,引起主电容屏内部绝缘强度不够,引发 4~5 片电容屏发热变形。进一步解体发现电容单元与电磁单元连通的密封圈严重变形导致电容单元绝缘油渗入电磁单元,电磁单元油位上升。

1.4 小结

该故障是由于密封圈安装时主电容单元的绝缘油渗漏至电磁互感器单元所致。设备巡视时运行人员未对电磁单元的油位上涨及时关注,未能在故障初期及时发现。

2 电磁单元有异常发热点

2.1 缺陷概况

2006 年红外测温发现某变电站 220 kV II 母压变 B 相图谱异常。该电容式电压互感器型号为 WVB220-10H,图谱显示电磁压变单元一异常发热点达 40℃,较正常高 15℃,二次电压无异常。

2.2 分析判断

采用图像特征判断法结合同类比较判断法^[2]进行综合分析,发热源是一个点,根据电容式电压互感器电磁单元的结构判断该位置是阻尼电阻,可能是阻尼电阻螺栓离箱壁太近造成环流引起发热。

2.3 现场检查处理

停电后首先对该压变进行了例行试验,无异常。进而对电磁单元进行检查,发现阻尼电阻的螺杆碰触箱壁,即对阻尼电阻安装位置进行了调节,重新投运后测温恢复正常。

2.4 小结

该缺陷是因为生产厂制造工艺不良所致,该类缺陷初期不影响设备运行,运行巡视也不易发现,但若长此以往会使绝缘油质裂化而导致严重的故障。

3 电磁单元整体发热

3.1 缺陷概况

收稿日期:2011-12-27;修回日期:2012-02-01

2010 年红外测温发现某变电站 110 kV 线路压变 B 相图谱异常。该电容式电压互感器型号为 WVL110-10H,电磁单元整体发热,最高温度近 90℃,判断为电磁单元故障,立即将设备停运。因为该电压互感器为备自投检无压专用压变,电压监测数据不上传,考虑到设备及检修人员的安全,未安排现场测控装置调阅实时电压数据。

3.2 解体试验及分析

对故障互感器进行了相关试验,因电容式电压互感器介损试验是从压变二次侧升压激磁进行,而压变单元故障致使无法升压,介损试验无法进行,绝缘电阻测试显示电容单元 C₂ 末端 δ 点对地绝缘为 0。将电容单元和电磁单元分离,对电容单元进行了电容量及介损试验,结果如表 2 所示。

表 2 电容单元试验数据

测试部位	故障后试验		上次例行试验	
	电容量 /PF	介质损 /%	电容量 /PF	介质损 /%
C ₁	12 463	0.07	12 580	0.10
C ₂	49 413	0.07	50 560	0.08
C 总	99 527	0.07	10 073	0.08

故障后电容量与介损数据与上次例行试验数据相比无明显变化,可判断电容单元未发生故障^[3]。

对电磁单元进行解体分析及试验,电磁单元中绝缘油经历高温放电后颜色呈墨绿色。空载试验一合闸电流就达数安培,无法进行。随后进行了中间压变一二次直流电阻(如表 3 所示)和绝缘电阻试验,绕组间绝缘电阻大于 1 000 MΩ。

表 3 线圈直流电阻试验数据

线圈	二次绕组 /Ω		一次绕组 /Ω
	a-n	da-dn	
试验值	0.06	0.213	2 210
出厂值	0.064	0.208	2 466

试验数据显示,故障后一次绕组电阻值与出厂值的误差为 11.6%(规程要求≤10%),二次绕组试验数据正常,初步分析是一次绕组存在匝间短路。从

外观观察,电磁单元中的阻尼器及补偿电抗器无异常,对电磁式电压互感器进一步解体检查,互感器铁心无异常,一次绕组绝缘损坏,因故障发展严重无法准确判断故障的初始位置,参与解体的厂方技术人员分析是因一次绕组的调压绕组匝间绝缘损坏继而向内外延伸导致故障进一步发展。

3.3 小结

这是一起较为严重的设备故障,推测分析,该互感器电磁单元一次绕组调压绕组部分绝缘薄弱,在运行中进一步恶化导致一次绕组绝缘故障,该设备是检无压用的线路压变,电压检测量未上传,若及时发现并停运设备将导致设备爆炸的恶性故障。

4 结束语

电容式电压互感器故障主要分为电容单元故障和电磁单元故障,二次电压监测和红外测温是发现电容式电压互感器故障及早期缺陷的有效手段。建议所有的电容式电压互感器均应具备二次电压监视功能,对于系统中检无压用的电压互感器,目前无电压监测信号上传,建议增加此信号。同时对电容式电压互感器应加强红外测温工作,其电容单元故障时温差较小(通常 0.5~1 K),测温后应使用相应软件进行精确分析;电磁单元若发生整体温升或者局部过热应结合温升数值、故障部位及油试验数据进一步检查分析。采用红外测温与电压监视相结合的监测手段,能及时有效地发现各类电容式电压互感器的缺陷,保证该类设备的稳定运行。

参考文献:

[1] Q/GDW168—2008,输变电设备状态检修试验规程[S].
[2] DL/T664—2008,带电设备红外诊断应用规范[S].
[3] 何子东,付炜平,霍春燕.红外监测诊断电容式电压互感器故障分析[J].高压电技术,2008(6):227-229.

作者简介:

张春燕(1976),女,江苏扬州人,高级工程师,从事变电检修管理工作。

Analysis of Several Accidents of Capacitor Voltage Transformer Faults

ZHANG Chun-yan^{1,2}

(1.North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2.Yangzhou Electric Power Supply Company, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Several typical accidents of capacitor voltage transformer faults are introduced first, including secondary abnormal voltage increase, electromagnetic unit heat and so on. Based on the test and strip inspection results, the causes of faults are analyzed and the corresponding counter measures are also presented. Besides, it is pointed that the secondary voltage monitoring and infrared temperature measuring are effective means for the diagnosis of capacitor voltage transformer and experiences should be further gained in actual operation.

Key words: capacitor voltage transformer (CVT); fault; analysis

500 kV 主网电压集中控制模式下的调压方法

蒋宇¹, 张勇¹, 胡鹤轩²

(1.江苏电力调度控制中心, 江苏 南京 210024; 2.河海大学能源电气学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对目前全国范围内正在推进的“大运行”模式下电网管理、控制方式的变革,从工程实际的角度出发,指出了高度集中式无功电压调节控制模式下出现的新问题,进而提出了以无功电压灵敏度为基础的目标优化辅助调压控制策略,以解决“大运行”模式下集中监控调压遇到的实际问题;算例仿真验证了基于无功电压灵敏度的辅助调压方法的正确性。

关键词:电压控制;无功电压;灵敏度

中图分类号: TM714.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2012)03-0017-03

随着2011年“大运行”体系建设的完成,江苏500 kV主网无功电压的调节模式在全国率先发生了根本性的变革。主网无功电压控制从原有的以500 kV枢纽变电站为独立控制单元的分散调压方式转变为更加集约化、扁平化、专业化的采用远方集中调压控制的运行管理模式,由省调直接对全省所有500 kV变电站的并联电容器、电抗器进行监控。在江苏500 kV电网电压管理控制结构发生历史性变革的背景下,针对江苏500 kV电网电压控制的流程、权限、现状特点,提出了实用性、适用性、专业性很强的无功电压控制新方法。该方法的应用可以为后续全网域(AVC)系统的建立提供技术和经验支持。

1 电网无功电压工程控制方法

随着电力系统的发展,电压控制方法日臻成熟。在诸多电压控制的算法中,常用的方法是以全局最优作为目标函数,采用最优解或线性规划的技术手段,可用于在线、离线分析下的多种工程场景。由于在电压的实际工程控制中,电压与有功功率、相角之间并不存在真正的完全解耦关系。因此,对于系统无功电压的调节会引起机组出力、系统电压稳定性、系统安全稳定性等多方面的相应变化。其次,目前对于电压调节的某些手段(如发电机进相运行)的研究还有待深入和完善。考虑上述原因,目前江苏500 kV电网主网的调压控制并没有采用AVC模式,而仍然采用传统的基于运行经验的调度模式。

1.1 国外无功电压控制工程技术

目前国际上得到成熟应用的无功电压控制技术包括以德国电力公司(RWE)为代表的两级电压控制系统和以法国电力公司(EDF)为代表的三级电

压控制系统。在德国RWE的电压控制系统中,将最优潮流(OPF)的优化计算结果直接发到各电厂,在调度控制中心,OPF基于状态估计和稳态测量实时运行在EMS的最高层次上,直接实现考虑运行约束以网损最小为目标的全局无功优化控制。在EDF的三级电压控制系统中一级电压控制为本地控制,控制时间常数一般为几秒钟;二级电压控制的时间常数为分钟级,控制的主要目的是保证中枢母线电压等于设定值;三级电压控制是其中的最高层,以全系统的经济运行作为优化目标,并考虑稳定性指标,最后给出中枢母线电压幅值的设定参考值,供二级电压控制使用^[1,2]。

1.2 国内无功电压控制工程技术

国内无功电压自动控制技术的应用,主要集中在省级电网的220 kV网架,且采用的控制模式也分为二级和三级两种控制系统,如福建电力公司、河南电力公司、江苏电力公司、安徽电力公司的AVC系统。在已经运行的电压自动控制系统中,参与自动调压的设备主要是省、地两级调度管辖的无功补偿装置和统调发电机组构成^[3]。

因此相对跨省的500 kV主网系统而言,现有的无功、电压自动控制系统不论是在容量上,还是在对大系统稳定性的影响上都相对较弱。

2 电压控制在新模式下的变化

2.1 江苏主网调压模式的变化

江苏电网故有的电压调整模式是按照网、省调设备管辖区域采用分层分区的平衡、调节模式。220 kV及以下的无功电压控制采用发电厂AVC系统、变电站VQC系统分别调整控制。而500 kV系统主网的电压控制管辖权属于网调,其电压控制流程如图1所示,是以单个500 kV变电站为调节单元的分散、低效、孤立的母线电压控制。

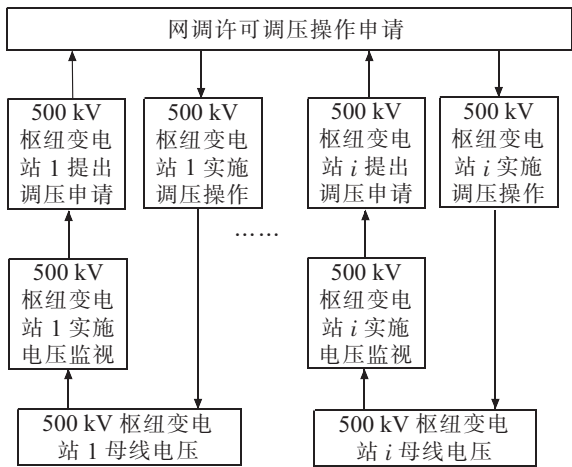


图 1 江苏电网主网原调压模式

在国家电网公司大幅度提高管理水平和运营效率的要求下,江苏省电力调控中心的监控业务作为大运行业务试点,于2011年6月28日12时正式运转。至此江苏省电网的无功电压调整控制权,统一、集中到省调控中心管辖范围,改革后的电压控制流程如图2所示。从而实现了对于500kV电网调压从分散控制到集中监视、协调控制的转变,也使得江苏境内全网域的无功电压集中、分层自动控制的实现成为可能。

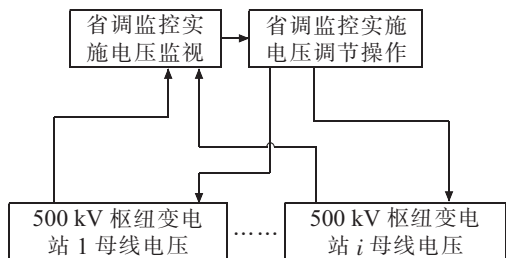


图 2 江苏电网主网现调压模式

2.2 江苏电网集控模式下的新问题

江苏电网原有调压模式下,各个500kV枢纽变电站只是根据本站的母线电压进行无功补偿装置的操作,并不考虑对相邻变电站母线电压的影响,也不考虑无功补偿装置的最优控制。而在新的调压模式下,省调监控原则是从区域电网全局的角度来考虑电网电压的平衡。在某一地区无功补偿调节能力用尽的情况下,采用邻近电网区域协助调压的方法成为常用技术手段。因此采用先进的AVC技术替代值班员的人工调压操作,成为江苏电网调压控制的最优方案。

然而江苏500kV主网无功电压的调控职权在省调层面,而设备管辖权在网调层面;由于电网设备责任权的不一致,导致江苏500kV主网无功电压自动控制系统在未来很长一段时间内都无法建设,仍然依靠值班人员凭经验远方集中手动遥控调压。因此

在新的调压模式下江苏省500kV主网出现了如何在短期内实现计及无功补偿装置使用高效性、经济性、可靠性下进行无功、电压高效调节的技术问题。

目前由于华东电网内500kV全网域的基于发电厂的AVC系统还没有建立,且500kV变压器在常态下不考虑采用有载调压技术手段,因此江苏省调监控的调压手段只有远方遥控投切500kV变电站并联电抗器、电容器。

3 基于无功电压灵敏度的辅助调压方法

为解决上述问题,提出了基于无功电压灵敏度的辅助电压调节方法。当电网中500kV母线电压越限后,系统根据无功电压灵敏度自动生成无功电压操作的最优序列,监控人员可以据此进行电压调节的操作。

3.1 机理分析

系统在稳点运行点附近的线性化潮流方程可以描述为^[4]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: ΔP 为有功功率的增量; ΔQ 为无功功率的增量; $\Delta \theta$ 为节点电压相角的增量; ΔV 为节点电压幅值的增量。

从式(1)中可以看出系统电压的增幅受到 P 和 Q 的影响,因此在每个运行点,可以令 P 为常数,从而得到 Q 和 V 之间的增量关系。虽然在公式中忽略了 P 的增量,但在 Q 和 V 的增量关系中还是包含了系统负荷或功率传送水平变化的影响。因此在式(1)中令 $\Delta P=0$,得到:

$$\begin{cases} \Delta Q = J_R \Delta V \\ J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \end{cases} \tag{2}$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \tag{3}$$

$$k = \frac{\Delta V}{\Delta Q} = J_R^{-1} \tag{4}$$

式中: J_R^{-1} 为收缩的 $V-Q$ 雅可比矩阵,它的第 i 个对角元素是节点 i 的 $V-Q$ 灵敏度。

根据式(2)、式(3)、式(4),就可以计算出描述系统无功电压灵敏度系数矩阵 k ,以系数矩阵 k 中各元素的大小为序。建立如式(5)所示目标函数:

$$F(x) = n + \left| \alpha \left(V_2 + \frac{V_1 - V_2}{2} - v \right) \right| \tag{5}$$

式中: n 为达到电压调节目的至少需要投运的无功装置台数; V_1, V_2 分别表示电压的上、下限值; v 为预测的调压后母线电压值; α 为加权系数。

根据无功电压灵敏度系数矩阵 k 的序列,通过

求解目标函数 $F(x)$ 的最小值,就可以得出高效的电压调节的控制方法。

3.2 辅助调压系统的实现

当系统中有 500 kV 母线节点电压越限值,或者有多个变电站母线电压均逼近电压控制限额时,辅助调压系统启动:

(1) 从 EMS 系统中读取电网的拓扑结构及遥测、遥信实时数据;

(2) 根据电网实时数据,自动生成矩阵 $J_{p\theta}, J_{pV}, J_{Q\theta}, J_{QV}$;

(3) 根据式(2)计算出矩阵 J_R ;

(4) 根据式(4)计算出系数矩阵 k ;

(5) 根据系数矩阵 k 中各元素的排序及求解目标函数 $F(x)$ 的最小值,就可生成无功电压操作的优化序列表。

4 仿真验证

文中采用对江苏 500 kV 主网全系统建模并由南瑞集团研发的稳态仿真平台 (DTS) 进行计算分析。算例预想的电压越限事故为,500 kV 吴江变母线电压越控制下限,实时值为 500.4 kV(控制限:下限500.5 kV,上限 515 kV),相邻协助调压站电气接线如图 3 所示。

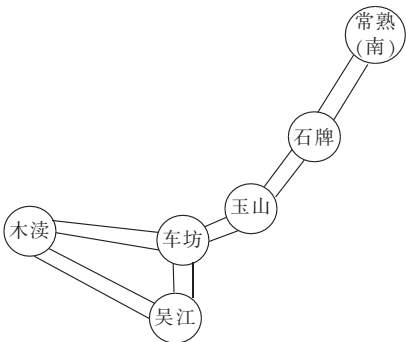


图 3 相邻调压变电站接线

经过文中设计的辅助调压系统计算,无功电压操作优化序列如表 1 所示。从表 1 中可以看出,应优先考虑投入吴江变本站的电容器,且以 331 或 332 电容器为最优选择。如果此时需要考虑相邻变电站协助调压,则以操作石碑变或玉山变电容器为优先选择。

从表 2 所示的操作不同电容器的仿真结果可以看出,投入表 1 中第一序位的吴江变 331 或 332 电容取得了最好的调压效果,而木渎变需要投入 2 组电容器,常熟(南)变需要投入 3 组电容器才能达到调压目的。

以上仿真结果验证了基于无功电压灵敏度辅助

表 1 电压操作最优序列

操作电容器	灵敏度顺序	操作电容器	灵敏度顺序
吴江变 312	2	石碑变	4
吴江变 322	2	玉山变	4
吴江变 331	1	车坊变	3
吴江变 332	1	木渎变	5
常熟(南)变	6		

表 2 投入不同无功补偿装置的仿真结果

变电站	操作电容器	控制后电压 /kV
吴江变	331	500.9
吴江变	332	500.9
吴江变	312	500.8
吴江变	322	500.8
车坊变	311	500.7
石碑变	314	500.5
玉山变	315	500.5
木渎变	312,323	500.5
常熟(南)变	352,353,354	500.5

调压方法的正确性,也证明了在采用相邻变电站辅助调压手段时效率不同的多种调压方法同时存在。

5 结束语

江苏电网作为国家电网公司“三集五大”改革试点单位,在全国率先完成了以高效化、专业化为方向的转变过程。电网管理方式的变革必然带来电网调节技术上的革新,文中针对电网转型期内超大型、综合化、智能化的自动调压系统无法建立的情况,提出了简单易行、投入少见效快、工程适用性强的基于无功电压灵敏度的辅助调压方法。该调压策略的实施,为今后覆盖全网的 AVC 系统的建立提供实践经验和工程技术支持。

参考文献:

[1] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等.江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现[J].电力系统自动化,2004,28(22):89-93.
[2] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等.基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J].电力系统自动化,2003,27(8):16-20.
[3] 陆圣芝,胡 伟,罗建裕.江苏电网分层分区研究[J].江苏电机工程,2000,19(3):11-13.
[4] 王锡钊.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2007.

作者简介:

蒋 宇(1980),男,四川自贡人,工程师,从事电网运行管理工作;
张 勇(1968),男,江苏南京人,高级工程师,从事电网运行管理工作;
胡鹤轩(1975),男,江苏南京人,副教授,从事电力系统自动化研究工作。

电动机热过载保护研究

陆征军¹,王红青²,赵华军³,赵希才¹

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.华东电力试验研究院有限公司,上海 200437;

3.安徽开发矿业有限公司,安徽六安 237400)

摘要:正在制定的 IEC 60255-149 电热继电器的功能要求和修订的 DL/T 744 微机电动机综合保护装置通用技术条件,均涉及到电动机热过载保护。阐述了电动机热过载的物理过程和热过载保护的构成、整定、试验和运行,并将基于电动机热模型的热过载保护与普通过流反时限保护进行定量对比分析,以便保护电动机免受热过载危害的同时,合理地利用电动机的过载能力。

关键词:电动机保护;热过载保护;热模型;反时限特性

中图分类号:TM588.1

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2012)03-0020-04

国际电工委员会正在制定 IEC 60255-149 电热继电器的功能要求以取代原来的 IEC 60255-8—1990^[1](转化后的国家标准为 GB/T 14598.15—1998 电气继电器 第8部分:电热继电器^[2]),其中重点考虑的正是电动机热过载保护。与此同时,电力行业标准 DL/T 744—2001 微机电动机综合保护装置通用技术条件^[3]也正在修订当中。因此有必要对电动机热过载机理和热过载保护的构成、整定和试验进行总结,以便更好地保护电动机免受热过载的危害。

1 可能导致电动机热过载的运行工况

在电机上电起动阶段,可能由于电动机所带动的负荷过大或其他原因致使电动机不能转动,即发生堵转。在加速阶段,如果在某些转速下加速转矩低于临界转速,电动机可能长时间运行在低速上而不能达到额定速度。此时电流仍大于稳态额定电流,持续时间过长可能导致热过载。在稳定运行阶段,额定转速附近电动机拖动的负荷增大可能导致出现持续过载,甚至发生堵转。本文重点讨论稳定运行时的持续过载。

2 电动机热过载模型

热过载发生时,对电动机产生危害的决定因素是绝对温度,温度过高会使绝缘老化,缩短电动机寿命,甚至导致绝缘破坏。可以通过测量电动机的电流间接地监视绕组和转子的发热情况。

电动机的温度 $\theta_{\text{Equipment}}(t)$ 取决于环境温度 θ_{Ambient} 和温升 $\Delta\theta(t)$:

$$\theta_{\text{Equipment}}(t) = \theta_{\text{Ambient}} + \Delta\theta(t) \quad (1)$$

电动机的温升 $\Delta\theta(t)$ 由发热功率 P_{Heat} 和散热功

率 P_{Diss} 共同决定:

$$P_{\text{Heat}} - P_{\text{Diss}} = m \cdot c_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = C_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: m 为电动机质量; c_{th} 为比热; $C_{\text{th}} = m \cdot c_{\text{th}}$, 为电动机热容量。

P_{Heat} 即由流过定子绕组的电流在绕组电阻上产生的热量:

$$P_{\text{Heat}} = r \cdot I_{\text{eq}}^2 \quad (3)$$

式中: r 为定子绕组电阻; I_{eq} 为考虑负序电流的影响而计算出的等值电流。其中 I_{eq} 为:

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{I_1^2 + q \cdot I_2^2} \quad (4)$$

或者为:

$$I_{\text{eq}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + q \cdot I_2^2} \quad (5)$$

式中: I_1 为正序电流; I_{rms} 为电流有效值; I_2 为负序电流; q 为负序电流热效应系数,可取 3^[4]。

P_{Diss} 与温升 $\Delta\theta(t)$ 、热阻 R_{th} 有关:

$$P_{\text{Diss}} = \frac{\Delta\theta(t)}{R_{\text{th}}} \quad (6)$$

将式(3)、式(6)代入式(2),可得:

$$r \cdot I_{\text{eq}}^2 - \frac{\Delta\theta(t)}{R_{\text{th}}} = C_{\text{th}} \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} \quad (7)$$

整理后,得到:

$$R_{\text{th}} \cdot r \cdot I_{\text{eq}}^2 = R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}} \cdot \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) = \tau_{\text{th}} \cdot \frac{d\Delta\theta(t)}{dt} + \Delta\theta(t) \quad (8)$$

式中: $\tau_{\text{th}} = R_{\text{th}} \cdot C_{\text{th}}$, 为热时间常数。

设电动机最大允许温升为 $\Delta\theta_{\text{max}}$, 对应最大允许连续运行电流为 $I_{\text{eq-max}}$, 则达到热平衡状态时:

$$R_{\text{th}} \cdot r \cdot I_{\text{eq-max}}^2 = \Delta\theta_{\text{max}} \quad (9)$$

用式(9)对式(8)进行归一化处理,并令 $H(t) = \frac{\Delta\theta(t)}{\Delta\theta_{\max}}$,则有:

$$\dot{I}_{\text{eq-pu}}^2 = \tau_{\text{th}} \cdot \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \quad (10)$$

$$H(t) = H_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}} + I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}}) \quad (11)$$

式(11)中: H_0 为初始值。当 $t \geq 5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 时:

$$H(t) \approx I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}}) \quad (12)$$

若 $I_{\text{eq-pu}} \leq 1$,则当达到热平衡状态时,取 $t \rightarrow \infty$,由式(11)可得:

$$H(t \rightarrow \infty) = I_{\text{eq-pu}}^2 \quad (13)$$

若 $I_{\text{eq-pu}} > 1$,则当 $H(t) = 1$ 时,温升达到 $\Delta\theta_{\max}$,保护跳闸,所需时间可通过求解式(11)得到:

$$t = \tau_{\text{th}} \cdot \ln \left(\frac{I_{\text{eq-pu}}^2 - H_0}{I_{\text{eq-pu}}^2 - 1} \right) \quad (14)$$

当电动机停止工作后,将逐步冷却:

$$H(t) = H_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}} \quad (15)$$

注意到式(15)中的时间常数是不同的。因为电动机堵转、静止时,热量通过传导和辐射耗散;加速时,热量通过传导和对流耗散;稳定运行时,主要靠对流耗散。显然,静止时的散热时间常数要长于稳定运行时。令 $\tau_{\text{th2}} = k \cdot \tau_{\text{th}}^{[4]}$, k 可取 1.5~4.5,视环境定。

3 电动机热过载保护的实现

为应对电动机的堵转、加速时间过长,电动机保护需要配置堵转保护、启动时间过长保护。这些保护一般由定时限过电流保护构成,当实际电流超过设定电流并达到整定延时,动作于出口跳闸^[5]。而稳定运行阶段的热过载,则需要在考虑电动机热模型的基础上设计保护方案^[6]。

3.1 算法的实现

热过载保护可以采用递归算法。设微机继电保护装置每隔 T 时间处理一次数据且 $T \ll \tau_{\text{th}}$, $T \ll \tau_{\text{th2}}$,分别对式(11)、式(15)离散化处理后,得到:

$$\begin{cases} H(0) = H_0 \\ H(t) = H(t-T) \cdot (1 - \frac{T}{\tau_{\text{th}}}) + I_{\text{eq-pu}}^2 \cdot \frac{T}{\tau_{\text{th}}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} H(0) = H_0 \\ H(t) = H(t-T) \cdot (1 - \frac{T}{\tau_{\text{th2}}}) \end{cases} \quad (17)$$

当 $H(0) = 1$ 时,热过载保护动作。

3.2 冷态特性和热态特性

当热过载发生之前电动机处于无负荷电流的状态时, $H_0 = 0$; 当热过载发生之前电动机有稳态负荷电流且达到平衡态,则根据式(13), $H_0 = I_{\text{eq-pu}}^2$ 。

一个特殊情况是,当电动机正常运行时,继电保护装置自身因故退出运行一段时间后又投入运行。若装置短时间退出(例如装置复位),应记忆保护装置退出运行前 $5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 数据窗的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为重新投入运行时的 H_0 ; 若装置长时间退出,则将重新投入运行时刻的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为 H_0 。继电保护装置宜支持这一功能。

3.3 环境温度采集

热过载发生时,对电动机产生危害的决定因素是绝对温度。上文中的公式推导中,计算的结果是温升,环境温度缺省为 40 °C。如果能够采集环境温度,则可以更精确地计算电动机的发热情况。这可以通过对 I_{eq} 进行修正来实现,例如^[5]:

$$I_{\text{eq-pu}} = \frac{I_{\text{eq}}}{k \cdot I_{\text{max}}}$$

$$k = \begin{cases} 1, \theta_{\text{Ambient}} \leq 40 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1.4 - (0.01 \cdot \theta_{\text{Ambient}}), 40 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \theta_{\text{Ambient}} \leq 65 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.75, \theta_{\text{Ambient}} \geq 65 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (18)$$

3.4 实例

以南瑞继保 RCS-964X 系列电动机保护测控装置为例,其热过载保护的动作为:

$$\begin{cases} I_{\text{eq}}^2 = k_1 \cdot I_1^2 + k_2 \cdot I_2^2 \\ \left[\left(\frac{I_{\text{eq}}}{I_e} \right)^2 - (1.05)^2 \right] \cdot t \geq \tau \end{cases} \quad (19)$$

式中: I_{eq} 为等值发热电流; k_1, k_2 为系数; I_1, I_2 分别为正序和负序电流; I_e 为电动机额定电流; t 为持续时间; τ 为电动机热积累定值(即发热时间常数)。 k_1 取 1,但在电动机启动阶段(根据电动机启动时间定值判断)自动取 0.5,以防止电动机正常启动过程中热过载保护误启动; k_2 用于模拟负序电流的增强发热效应,可取 3~10。

装置设有告警段,当电动机热积累定值达到一定水平时,可以先发出告警信号,提醒运行人员尽快采取措施。告警水平可在 30%~100% 范围内整定,建议取 80%。

热过载保护动作跳闸后,要等到电动机散热到允许启动的温度时,才能再启动。散热时间常数可整定为 1~5 倍的发热时间常数。装置设有热复归开入,在需要紧急启动的情况下,可通过热复归开入强

制将热模型恢复到“冷态”。

4 整定计算

4.1 整定计算

热过载保护的特性由 2 个参数决定：最大允许连续运行电流 $I_{\max}$ 和时间常数 $\tau_{\text{th}}, \tau_{\text{th}2}$ 。

$$I_{\max}=k \cdot I_{\text{B}} \tag{20}$$

其中, I_{B} 可取电动机额定电流；系数 k 可取 1.1~1.2。

如果电动机生产厂家依照 IEEE 620^[7]提供了热临界曲线,则可以参考文献[4]通过曲线拟合确定合适的时间常数。这样可以最大限度地发挥电动机的过载能力,避免不必要的跳闸。

如果无法取得热临界曲线,时间常数 τ_{th} 可以根据电动机 1 s 允许电流 $I_{1\text{s}}$ 或者 6 倍额定电流跳闸时间 $t_{6I_{\text{B}}}$ ^[4]计算：

$$\tau_{\text{th}}=\left(\frac{I_{1\text{s}}}{I_{\max}}\right)^2 \tag{21}$$

$$\tau_{\text{th}}=32 \cdot t_{6I_{\text{B}}} \tag{22}$$

4.2 与普通反时限电流保护比较

国内电动机保护，长期以来大多采用以反时限过流为主的组合保护,以极端反时限为例,其特性方程为：

$$t=\frac{80}{\left(\frac{I}{I_{\text{p}}}\right)^2} \cdot \tau_{\text{p}} \tag{23}$$

根据式(5)和式(20),电动机正常运行时 $H_0=$

$I_{\text{eq-pu}}^2=\left(\frac{I_{\text{B}}}{k \cdot I_{\text{B}}}\right)^2$ 。系数 k 取 1.15,代入热过载保护的特性方程(14)并做幂级数展开,可以得到：

$$t \approx \frac{0.244}{\left(\frac{I_{\text{eq}}}{I_{\max}}\right)^2-1} \cdot \tau_{\text{th}} \tag{24}$$

式(23)与(24)形式一致,反时限电流整定值 I_{p} 与等值电流 I_{eq} 对应,反时限时间整定值 τ_{p} 与热时间常数 τ_{th} 对应。

分析式(23)与式(24),热过载保护根据电动机的物理模型进行设计,考虑到负序的发热效应,能够在电流不平衡时快速动作。另外,由于反时限保护长时间运行积累了成熟的经验整定值,时间常数 τ_{th} 也可根据以往反时限保护的整定经验,定量推导得出。

热过载保护利用热模型进行发热散热计算,更加真实有效地反映了电动机的发热情况,在保护电动机免受热过载危害的同时能够充分、合理地利用电动机的过载能力。对于负荷波动大的电动机,热模

型能够忠实地跟踪记录每次负荷波动时的发热情况并且进行累计,一旦热累积超过允许值热过载保护就发出跳闸命令；而常规反时限保护在负荷波动较大的情况下,可能会频繁地启动和返回,不能有效地保护电动机免受热过载的危害。

5 现场试验

5.1 现场试验

依据式(14),并令 $H_0=0$,可以画出电动机冷态特性曲线,即电流-动作时间曲线。

每次试验前,强制继电保护装置的 $H_0=0$ 以模拟电动机冷态状态;如果继电保护装置不具有强置 H_0 的功能,则应将 $\tau_{\text{th}2}$ 设置成最短,并在每次试验前将继电保护装置静置一段时间(大于 $5 \cdot \tau_{\text{th}2}$),以模拟电动机的冷却过程。

分别向继电保护装置输入 $1.2I_{\text{B}}, 1.6I_{\text{B}}, 2.0I_{\text{B}}, 5.0I_{\text{B}}, 10.0I_{\text{B}}$ 的电流,记录继电保护的動作时间,并与冷态特性曲线进行比较,得到動作时间误差。该误差不宜超过理论计算值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 100\text{ ms}$ (取两者中的大值)。

以安装于某矿业公司的 RCS-964X 系列电动机保护测控装置为例。其定值为： $I_{\text{e}}=0.4I_{\text{n}}$ (I_{n} 为互感器二次额定电流)；电动机启动时间为 0； $\tau=15\text{ min}$ ； $k_2=6$ 。每次试验过后,通过热复归开入强制将热模型恢复到“冷态”。其试验结果如表 1 所示,误差在允许范围内。

表 1 试验结果

输入 电流	理论动作 时间 /s	实际动作 时间 /s	相对误 差 /%	绝对误 差 /s
1.2 I_{e}	2 666.667	2 763.531	3.63	96.864
1.6 I_{e}	617.496	639.782	3.61	22.286
2.0 I_{e}	310.613	320.235	3.10	9.622
5.0 I_{e}	37.661	38.849	3.15	1.188
10.0 I_{e}	9.100	9.364	2.90	0.264

4.3 运行

正如前文所述,假如在电动机正常运行时,继电保护装置自身因故退出运行一段时间后再次投入运行时,若装置短时间退出(例如装置复位),应记忆保护装置退出运行前 $5 \cdot \tau_{\text{th}}$ 数据窗的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为重新投入运行时的 H_0 ；若装置长时间退出,则将重新投入运行时刻的 $I_{\text{eq-pu}}^2$ 计算值作为 H_0 ,以防止继电保护装置误动作或者拒动。

6 结束语

微机电机保护装置已经配置了比较完备的热过载保护。为了更好地利用电动机的过载能力同时保护电动机免受热过载的危害,应按照电动机的实际特性进行继电保护整定,通过现场试验考察其精度,在运行过程中也要注意继电保护装置对热积累的记忆功能。

参考文献:

[1] IEC 60255-8—1990, Electrical relays - Part 8: Thermal electrical relays[S].
[2] GB/T 14598.15—1998, 电气继电器 第 8 部分: 电热继电器 [S].
[3] DL/T 744—2001, 微机电机综合保护装置通用技术条件 [S].
[4] 卢庆港, 解中秀. 异步电动机热模型保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 107-113.

[5] AREVA MiCOM P241, P242 & P243 Rotating Machine Protection Relay Technical Manual[G]. 2008.
[6] 陆海峰, 王石刚, 曹家勇. 变频器中电动机过载保护的算法及其实现[J]. 工矿自动化, 2008(4): 33-35.
[7] IEEE Std 620—1996, IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines[S].

作者简介:

陆征军(1973)男, 江苏张家港人, 工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的装置研发工作;
王红青(1969), 男, 上海青浦人, 高级工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的技术监督和管理工作;
赵华军(1967), 男, 安徽六安人, 工程师, 从事电力传动研究工作;
赵希才(1969), 男, 山东平阴人, 研究员级高级工程师, 从事继电保护与变电站自动化系统的技术管理工作。

Research on the Motor Thermal Overload Protection

LU Zheng-jun¹, WANG Hong-qing², ZHAO Hua-jun³, ZHAO Xi-cai¹

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Power Co.Ltd., Nanjing 211102, China; 2. East China Electric Power Test & Institute Co.Ltd., Shanghai 200437, China; 3. Anhui Mining Development Co.Ltd., Liuan 237400, China)

Abstract: The IEC 60255-149 measuring relays and protection equipment - part 149: functional requirements for thermal protection and DL/T 744 general specification for microprocessor-based motor protection equipment, both relate to motor thermal overload protection. The physical process of motor thermal overload and the structure, setting, test and operation of thermal overload protection are expounded in the paper. Besides, the thermal overload protection based on motor thermal model and the common inverse-time over-current protection are compared and analyzed quantificationally. Thus, the motor thermal overload protection can use the motor overload ability rationally.

Key words: motor protection; thermal overload protection; thermal model; inverse time characteristics

(上接第 19 页)

Voltage Control Strategy of 500 kV Power Grid in Voltage Centralized Control Mode

JIANG Yu¹, ZHANG Yong¹, HU He-xuan²

(1. Jiangsu Electric Power Dispatching and Communication Center, Nanjing 210024, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The management and control of power system are changing to the “big run” mode, which is promoted nationwide in power reform. From the engineering practice view, new problems appeared in such highly centralized reactive voltage control mode. In order to solve these problems, voltage optimization control strategy based on reactive voltage sensitivity is put forward. Simulation results show the validity of the proposed control strategy.

Key words: voltage control; reactive voltage; sensitivity

何为电离辐射?

辐射是不依人的意志为转移的客观事物。在人们赖以生存的环境中, 辐射无处不在。太阳发出的由核反应的光和热, 是人类生存所必需的, 天然的放射性物质广泛分布于整个环境中。就连我们的身体内, 也存在着 ¹⁴C, ⁴⁰K 以及 ²¹⁰Po 之类的放射性核素。地球上的所有生命, 都是在存在着此类辐射都背景下不断进化而来的。

按照辐射作用于物质时所产生效应的不同, 人们将辐射分为电离辐射与非电离辐射两类。电离辐射包括宇宙射线、X 射线和来自放射性物质的辐射。非电离辐射包括紫外线、热辐射、无线电波和微波。

基于组合决策的孤岛检测技术在微电网中的应用

蒋燕¹, 张艳², 张祖丽², 张继红³, 张玉琼⁴

(1.重庆电力高等专科学校, 重庆 400053; 2.青海海西供电公司, 青海 格尔木 816000;

3.重庆电力调控中心, 重庆 400053; 4.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:分析了电压相位突变、频率变化率和主动投切电容回路3种微电网孤岛检测方法的原理及特性,在此基础上给出了一种以被动检测为主,主动检测为辅的组合决策孤岛检测法,仿真结果表明,该方法可消除单一孤岛检测法存在的检测盲区,在不同的微网运行状态和不同负荷构成情况下均可实现孤岛检测。

关键词:微电网; 孤岛检测; 相位突变; 频率变化率; 主动投切电容; 组合决策

中图分类号: TM71

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)03-0024-03

孤岛检测是微电网由并网向孤岛平稳过渡过程中一个必要的检测环节。根据检测原理不同,可分为主动检测法和被动检测法。主动检测法^[1]是通过人为向系统引入微小电压、电流或频率扰动信号进行检测判定,优点是盲区较小、灵敏度较高,缺点是如引入系统的扰动控制不当,会导致微电网进入孤岛状态后无法稳定运行。被动检测法^[2]是通过采集本地信号,在不外加任何扰动的情况下进行孤岛检测,其优点是原理简单,设备投入少,易于实现,适用于微电网需求,缺点是检测盲区较大,不适合单独使用。为保障微电网运行状态转换的平稳性,同时考虑检测精度、灵敏度及扰动对系统稳定运行的影响,文中提出了适用于微电网特点,以被动检测为主,主动检测为辅的组合决策孤岛检测技术。

1 常用被动孤岛检测法及原理

1.1 相位突变检测法

相位突变法是利用逆变电源输出电流与公共连接点(PCC)电压间相位差变化来检测孤岛的发生。并网状态下,PCC电压受主网钳制,微电源输出电流与PCC电压同相位^[3]。当孤岛产生时,由于负载阻抗角的存在,使得PCC处电压相位发生跳变,与电流的相位差转变为负载的阻抗角。因此,通过逆变器输出电流与PCC电压的相位差变化即可判定孤岛的产生。相位突变检测法简单、易于实现,不会对逆变器输出的电能质量和系统的暂态稳定产生影响。但当负载阻抗角接近0时,即负载近似呈阻性时,该方法失效,需采用其他孤岛检测手段进行辅助判断。

1.2 频率变化率法

频率变化率法的理论基础是假设在孤岛形成瞬间,分布式电源发出的电力和孤岛负荷间存在功

率差额,即不平衡功率。这种不平衡功率致使孤岛产生瞬间频率变化,因此采用频率变化率 df/dt 作为判据,可以检测孤岛的产生^[4]。

$$\frac{df}{dt} = -\frac{(P_L - P_{MG})f_N}{2HP_{GN}} \quad (1)$$

式中: P_L 为负荷功率; P_{MG} 为微电源输出功率; f_N 为系统额定频率; H 为分布式发电机惯性系数; P_{GN} 为分布式发电机额定容量。频率变化率法的检测灵敏度受功率不平衡度影响较大。功率不平衡度较大时能可靠检测;功率不平衡度较小时,检测灵敏度差。因此,频率变化率法一般需与其他检测手段配合使用。

2 选择性投切并联电容回路的主动检测法

选择性投切并联电容回路孤岛检测法^[5]是通过向微电网与主网联络线微电网侧投入并联电容回路,引入无功电流扰动信号来进行孤岛检测,是一种典型的主动检测法。该方法通过检测PCC处的无功流量控制并联电容回路的投入,消除了微电网与主网间联络线上微潮流或零潮流时被动检测法失效的弊端。如图1所示电路,当检测回路检测到连接点PCC处无功流量为0时,将并联电容回路投入,再检测PCC处无功流量,如仍为0,则判定孤岛发生。基于选择性投切并联电容回路的主动孤岛检测逻辑如图2所示。

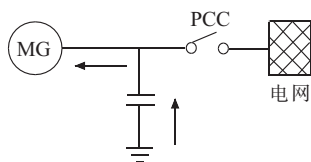


图1 PCC点断开时投入电容后无功流

投切并联电容回路的主动检测法可快速准确的检测出孤岛状态,灵敏度较高。由于投切电容并联回路会向系统引入扰动,需要合理控制扰动大小,在确保微电网孤岛运行稳定的情况下实现孤岛检测。

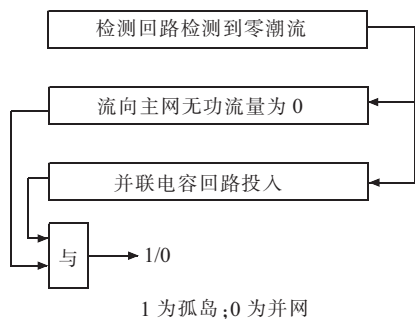


图2 选择性投切并联电容回路的主动检测逻辑

因此,从系统运行稳定性和可靠性出发,主动检测法一般作为后备检测手段,在其他检测方法的非正常工作区域投入使用。

3 组合决策孤岛检测法

3.1 组合决策孤岛检测法的基本原理

鉴于主动、被动两类检测方法在检测盲区上存在互补性,提出以被动为主、主动为辅的组合决策孤岛检测法。即孤岛检测时以相位突变和频率变化率组合作为主要的检测手段,对于微电网内部阻抗接近纯阻性且内部功率基本平衡的情况,采用投入电容回路作为辅助检测手段,通过引入 PCC 潮流变化和投入电容后阻抗角变化进行组合判断,提高孤岛检测可靠性和准确率。基于被动为主、主动为辅的组合决策孤岛检测法的逻辑如图3所示。

需要说明的是:在实际系统中大部分情况下采用相位突变法和频率变化率法组合即可,只有在极少数微电网阻抗角接近于0且功率平衡的情况下才需要电容回路的投入作为后备检测手段。

3.2 微电网组合决策孤岛检测仿真分析

分别采用相位突变检测法、频率变化率检测法、并联电容回路投切检测法以及组合决策法对微电网仿真电路进行孤岛检测仿真计算分析,验证组

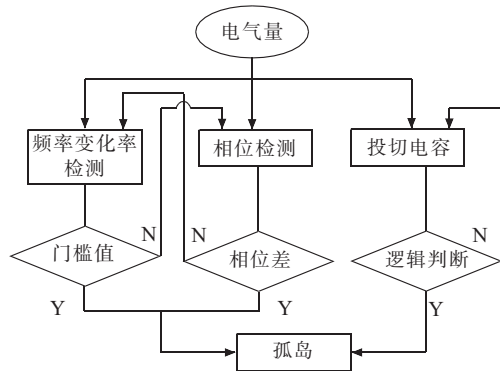


图3 被动为主、主动为辅的组合决策逻辑框

合决策孤岛检测技术在微电网的适用性。

3.2.1 仿真算例建模及检测判据说明

以图4微电网系统作为仿真电路,使用 Matlab/Simulink 仿真工具进行算例系统建模,如图5所示。图5微电网中的微电源通过逆变器与主电网相连,采用脉宽调制技术(PWM)对逆变器接口进行控制,保证微电网并网运行时与主电网同频、同压、同相位。仿真电路参数设定如下。

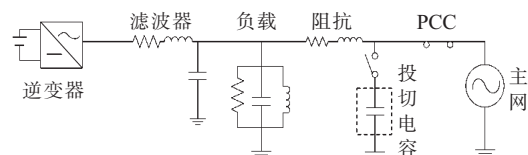


图4 微电网算例系统

(1) 主电网。等值为无穷大电源,电压 1.0 p.u., 频率 50 Hz, 等值电阻 $R=0.05\ 316\ \Omega$, 等值电感 $L=0.482\ \text{mH}$ 。

(2) PWM 控制单元。电压调节器比例增益 $K_u=0.25$, 积分增益 $T_u=25$; 电流调节器比例增益 $K_i=2.5$, 积分增益 $T_i=250$ 。

(3) 负载。为校验各种检测方法有效性,对微电网从主网受电和微电网功率基本自平衡2种方式考虑各种负载特性。微电网从主网受电,各种负载参

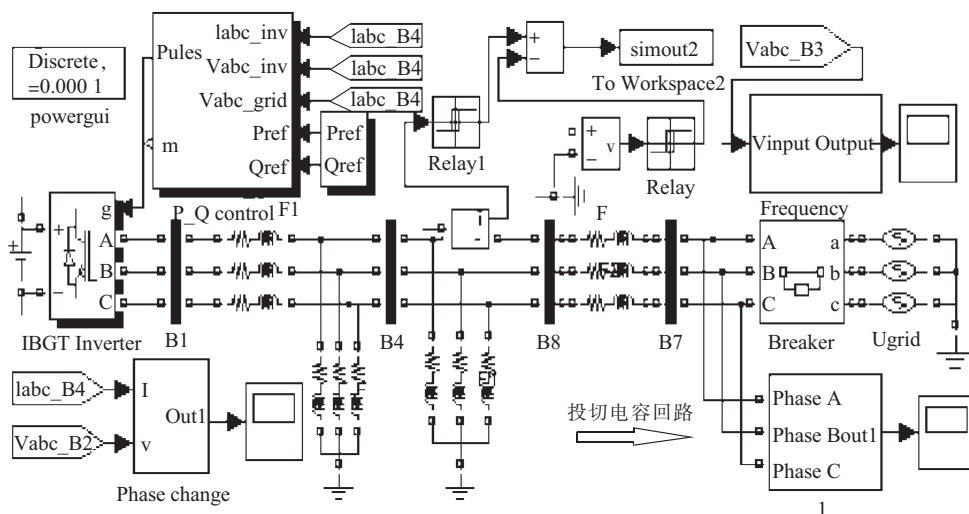


图5 微电网仿真电路

数:感性负载, $R=40\ \Omega$, $L=0.6\ \text{H}$, $C=16.9\ \mu\text{F}$;容性负载: $R=40\ \Omega$, $L=0.06\ \text{H}$, $C=169\ \mu\text{F}$;阻性负载, $R=40\ \Omega$, $L=0.06\ \text{H}$, $C=16.9\ \mu\text{F}$;纯电阻负载, $R=200\ \Omega$ 。微电网功率基本自平衡,各种负载参数:感性负载, $R=28\ \Omega$, $L=0.5\ \text{H}$, $C=12.7\ \mu\text{F}$;容性负载, $R=28\ \Omega$, $L=0.05\ \text{H}$, $C=127\ \mu\text{F}$;阻性负载, $R=28\ \Omega$, $L=0.05\ \text{H}$, $C=12.7\ \mu\text{F}$;纯电阻负载, $R=28\ \Omega$ 。

对微电网不同运行方式、不同负荷特性下微电网与主网联络线三相跳闸,形成孤岛。采用相位突变检测法、频率变化率检测法、并联电容回路投切检测法及组合决策法进行孤岛检测。其检测判据如下:

(1) 相位突变检测判据设定为 5° ,即相位差大于 5° 即判定为孤岛;

(2) 频率变化率检测的时间常数取滤波时间常数(0.10 s),门槛值为0.1 Hz/s,即频率变化率大于0.1 Hz/s、持续时间超过0.10 s即判定为孤岛;

(3) 并联电容回路的投切采用理想开关,即联络线电流过零瞬间投入电容(0.1 μF /相)。电容投入后实时检测并联电容回路上的电气量,以电压有效值作为判定量,判定是否为孤岛。

3.2.2 几种孤岛检测法检测效果对比

对图5仿真算例采用上述几种孤岛检测法对各种负载情况进行仿真计算,检测时间及效果如表1所示。

表 1 几种检测方法的检测时间及效果对比 s

负载		电压相位突变	频率变化率法	主动投切电容	组合决策法
微网从主网受电	感性	0.013	0.15	/	0.013
	容性	0.009	0.16	/	0.009
	阻性	—	0.12	/	0.12
	纯电阻	—	0.11	/	0.11
微网功率自平衡	感性	0.011	—	/	0.011
	容性	0.009	—	/	0.009
	阻性	—	—	0.016	0.016
	纯电阻	—	—	0.018	0.018

注:—为检测失败;/为检测方法不投入使用。

(1) 当微电网为非阻性负载(容性和感性)时,电压相位突变法可以快速检测出孤岛;当微电网为阻性或纯电阻负载时,电压相位突变法失效;

(2) 当微电网从主网受电时,频率变化率法可以成功检测孤岛,其中阻性和电阻负载能够快速进行孤岛检测,而容性和感性负载由于进入孤岛后导致微电网电压下降进而造成有功功率不平衡程度减弱,导致检测时间延长,检测速度较慢,整体而言,频

率变化法检测速度较电压相位突变法慢;当微电网功率自平衡时,频率变化率法失效;

(3) 当微电网功率自平衡且为阻性或纯电阻负载时,电压相位法和频率变化率法均失效,主动投切电容回路法可以快速检测出孤岛;

(4) 组合决策法以组合被动检测方法(电压相位突变为主判据、频率变化为辅助判据)为主要检测手段,以主动投切电容回路法作为辅助检测手段,是现有检测方法的综合应用,即在几种方法均有效的情况下,采取检测时间最短的方法,从而提高了微电网孤岛检测的成功率、检测速度和灵敏度。

4 结束语

在分析电压相位突变检测、频率变化率检测和主动投切电容回路3种孤岛检测方法的原理及检测特性基础上,提出了被动为主、主动为辅的组合决策孤岛检测法,使用Matlab/Simulink工具搭建微电网仿真模型,对微电网的不同运行方式、不同负荷特性下联络线跳闸,孤岛形成过程及采用各种孤岛检测法进行孤岛检测的过程进行仿真计算和对比分析,结果表明组合决策孤岛检测法消除了单一孤岛检测法存在的检测盲区,提高了检测速度和灵敏度,是一种适用于微电网的孤岛检测方法。

参考文献:

[1] YE Z H, KOLWALKAR A, ZHANG Y, et al. Evaluation of Anti-islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2004, 19 (5): 1171-1176.

[2] De MANGO F, LISERRE M, Dell AQUILA A, et al.Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems.PartI: Passive Methods[C].EPE-PEMC2006, Portoroz(Slovenia), 2006.

[3] 陈为民,陈国呈,吴春华,等.基于分布式并网发电的新型孤岛检测研究[J].电工技术学报,2007,22(8):114-118.

[4] FREITAS W, XU W, AFFONSO C M, et al.Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1315-1324.

[5] 朱铭炼,于正友,龚春英.一种新颖的主动移频式孤岛检测方法[J].电力电子技术,2009,43(11):31-32.

作者简介:

蒋 燕(1965),女,四川资阳人,副教授,从事电力系统及自动化研究工作;

张 艳(1973),女,山东乳山人,工程师,从事电网调度管理工作;

张祖丽(1977),女,河南南阳人,工程师,从事电网调度管理工作;

张继红(1964),男,重庆巴南人,高级工程师,从事电网调度管理工作;

测量用电流互感器数字补偿算法

吕建虎,胡忠林
(国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘 要:为了提高测量用电流互感器(CT)的精度,通常采用高磁导率的材料和大横截面积的核心使励磁电流最小化,这种做法会增加 CT 的制造成本。提出了一种提高测量用 CT 精度的数字补偿算法,根据副边电流测量值和铁心磁化特性,通过算法计算并补偿励磁电流来提高测量用 CT 的精度,仿真和实验验证了该算法的有效性。

关键词:测量;电流互感器;励磁电流;数字补偿

中图分类号:TM452 文献标志码:B 文章编号:1009-0665(2012)03-0027-04

互感器是基于电磁感应定律实现能量的转移,为了最大化原边绕组和副边绕组之间的耦合磁链,在绕组中插入了铁心,而铁心磁滞特性造成的非正弦励磁电流是测量用电流互感器(CT)产生误差的原因。采用高磁导率材料和大横截面积的核心,可以提高测量用 CT 的精度,得到最小化励磁电流,但会增加测量用 CT 的成本,增大其规格。电子式 CT 例如 Rogowski 线圈和光学 CT,消除了核心的磁滞效应,没有造成误差的问题,目前虽得到了应用,但长期运行的可靠性未得到很好的解决^[1]。

若能够计算并补偿励磁电流,则可以在铁心规格不变的情况下,有效地提高测量精度,或者设计出相同精度等级但铁心规格更小的测量用 CT。有源和无源零磁通 CT 就是利用了这一原理,有源零磁通 CT 在普通电流传感器的基础上,增加了一个检测绕组,利用电子线路动态跟踪铁心中的励磁电流并通过补偿绕组进行补偿,使铁心动态地达到零磁通状态^[2-4],但是有源零磁通 CT 补偿电路复杂,成本较高,可靠性也难以保证。无源零磁通 CT 无需外部电路提供补偿电流,可靠性和稳定性优于有源零磁通 CT,但也有其不足,对制造工艺要求较高,补偿的动态范围较窄。基于补偿励磁电流这一思想,提出了一种提高测量用 CT 精度的数字补偿算法,不需要改变测量用 CT 的电气结构,实现简单,只需对采集的数据进行数字处理,即可以提高测量用 CT 的精度。

2 数字补偿算法

分析测量用 CT 稳态运行时误差产生的主要原因,根据 CT 等效电路(如图 1 所示),可以得到:

$$i_1(t)=i_0(t)+i_{21}(t)=i_0(t)-\frac{N_2}{N_1}i_2(t) \tag{1}$$

式中: $i_1(t)$ 为原边电流; $i_2(t)$ 为副边电流; $i_0(t)$ 为励

磁电流; $i_{21}(t)$ 为折算到原边的副边电流值; N_1 为原边匝数; N_2 为副边匝数。从式(1)可以看出,误差是由励磁电流 $i_0(t)$ 造成的。而文中提出的数字补偿算法能够补偿励磁电流造成的误差,其基本思想为:根据测量得到的副边电流和测量用 CT 铁心磁化特性,计算出励磁电流 $i_0(t)$,由此得到的原边电流为折算到原边的副边电流加上励磁电流,可以实现比副边电流简单地乘以测量用 CT 变比对原边电流更精确地评估。

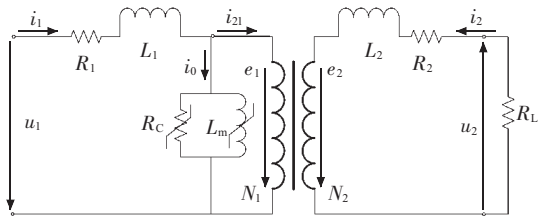


图 1 CT 等效电路图

测量用CT 的电气参数已知,则副边感应电压 $e_2(t)$ 为:

$$e_2(t)=R_L i_2(t)+R_2 i_2(t)+L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \tag{2}$$

$$e_2(t)=N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} \tag{3}$$

式中: R_2 为副边绕组的等效电阻; L_2 为副边绕组的漏感; R_L 为负载电阻; $\Phi(t)$ 为铁心中磁通。则测量用 CT t_0 时刻以后的磁通为:

$$\Phi(t)=\frac{R_2+R_L}{N_2} \int_{t_0}^t i_2(\tau) d\tau+\frac{L_2}{N_2} (i_2(t)-i_2(t_0))+\Phi(t_0) \tag{4}$$

式中: $i_2(t_0)$ 为 t_0 时刻的副边电流,常数; $\Phi(t_0)$ 为 t_0 时刻的初始磁通,未知,需要先确定初始磁通值。测量用 CT 正常运行时,磁通在 1 个周期 T 内的均值为 0,据此可推导出初始磁通值。令:

$$\varphi(t)=\frac{R_2+R_L}{N_2} \int_{t_0}^t i_2(\tau) d\tau+\frac{L_2}{N_2} (i_2(t)-i_2(t_0)) \tag{5}$$

则 $\varphi(t)$ 在 1 个周期 T 的均值为:

$$E[\Phi(t)] = E[\varphi(t)] + \Phi(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \varphi(t) dt + \Phi(t_0) = 0 \quad (6)$$

初始磁通为:

$$\Phi(t_0) = -\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \varphi(t) dt \quad (7)$$

$i_2(t_0)$ 直接测量得到, 根据式(7)计算出初始磁通 $\Phi(t_0)$, 则可以由式(4)确定 CT 的瞬时磁通 $\Phi(t)$ 。

为了便于数字实现, 对式(4), (6), (7)离散化, 假设副边电流 $i_2(t)$ 的周期为 T , 每周采样点数为 n , 采样间隔为 ΔT , 若 n 足够大, 经过推导, 得到测量用 CT 的磁通在第 k 个采样时刻离散表达式为:

$$\Phi(k) = \frac{R_2 + R_L}{N_2} \sum_{i=1}^k \Delta T \cdot \frac{i_2(i-1) + i_2(i)}{2} + \frac{L_2}{N_2} (i_2(k) - i_2(k_0)) + \Phi(k_0) \quad (8)$$

式中: 常数 $i_2(k_0)$ 为初始副边电流; $\Phi(k_0)$ 为铁心初始磁通。

为了计算式(8)中的磁通离散值, 需要预先获得测量用 CT 副边绕组的阻抗漏感和铁心的磁化特性, 这些数据为互感器的标称参数, 也可以通过一系列简单的实验室测试得到。其中, 铁心的磁化特性一般有 2 种描述方式: 一是简单的单值磁化曲线, 如文献[5]; 二是含有更多铁心磁化特性的磁滞回线。为了保证补偿的精度, 文中采用铁心的磁滞回线描述铁心的磁化特性。

结合测量用 CT 误差产生的原因和上述公式推导过程, 数字补偿算法主要步骤为:

(1) 前期准备工作: 辨识测量用 CT 参数: 副边绕组阻抗和漏感、铁心磁滞回线, 磁滞回线数据以磁通-励磁电流的形式保存在存储器中;

(2) 采集副边电流离散值 $i_2(k)$;

(3) 按式(8)计算铁心磁通 $\Phi(k)$, 并结合保存在存储器中的磁滞回线数据, 确定铁心的当前磁化轨迹;

(4) 将磁通 $\Phi(k)$ 映射到铁心的当前磁化轨迹中, 结合磁通变化趋势确定相应的励磁电流值 $i_0(k)$;

(5) 将励磁电流 $i_0(k)$ 与折算到原边的副边电流 $i_{21}(k)$ 相加, 结果即为补偿后的副边电流 $i_{21c}(k)$ (折算到原边)。

算法实现的流程如图 2 所示, 过程参数 sum 用于确定初始磁通, 为了消除式(8)中对副边电流离散积分带来的累积误差, 采用每周波都确定初始磁通

的方法, 即初始时刻 k_0 每一个周波改变一次。同时从流程图可以看出, 该数字补偿算法具有一个信号周期的延时。

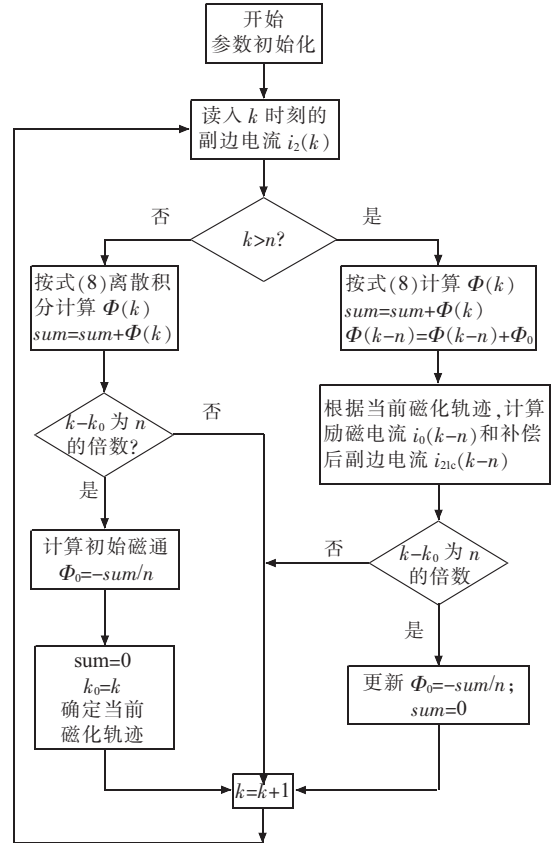


图 2 算法流程

3 仿真分析

为了验证该数字补偿算法的有效性, 在基于 MATLAB 平台的 CT 模型上对此补偿算法进行了仿真验证, CT 模型仿真参数如下: 变比为 1 A/100 mA; 额定负载为 10 Ω; CT 模型的磁滞回线组如图 3 所示, 一共测量了 10 组数据。

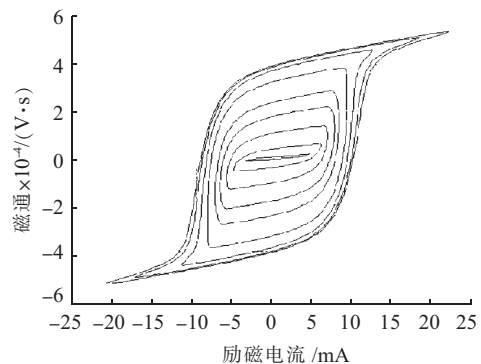


图 3 磁滞回线组

该 CT 模型工作在额定电流下的仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出, 由于励磁电流的存在, 测量得到的折算到原边的副边电流 $i_{21}(t)$ (虚线) 与原边电流 $i_1(t)$ (实线) 之间有差值; 图 4(b) 和图 4

(c) 展示的是仿真得到的磁通和励磁电流与计算得到的磁通和励磁电流,可以看出仿真值(实线)和计算值(虚线)基本一致;正因为励磁电流的仿真值和计算值基本一致,所以图 4(d)中的补偿后副边电流 $i_{21c}(t)$ (虚线)与原边电流 $i_1(t)$ (实线)近似重合,比差从补偿前的 -0.63% 降低到补偿后的 0.020% ,角差也从补偿前的 $25.30'$ 降低到补偿后的 $1.00'$ 。

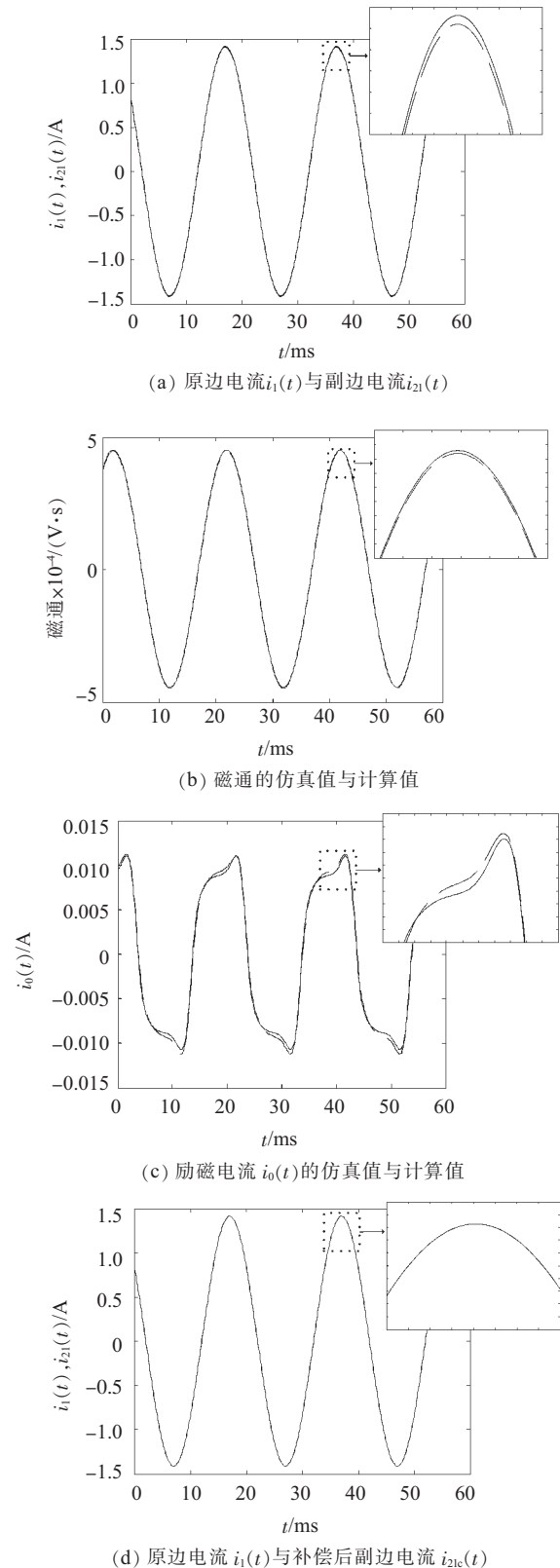


图 4 原边电流为额定电流时仿真结果

CT 模型原边电流为 $120\%, 20\%, 5\%$ 额定电流时的仿真结果如图 5 所示,从图中可以看出,补偿后副边电流 $i_{21c}(t)$ 与原边电流 $i_1(t)$ 的一致程度明显好于补偿前的副边电流 $i_{21}(t)$,具体的比差和角差改善结果如表 1 所示。

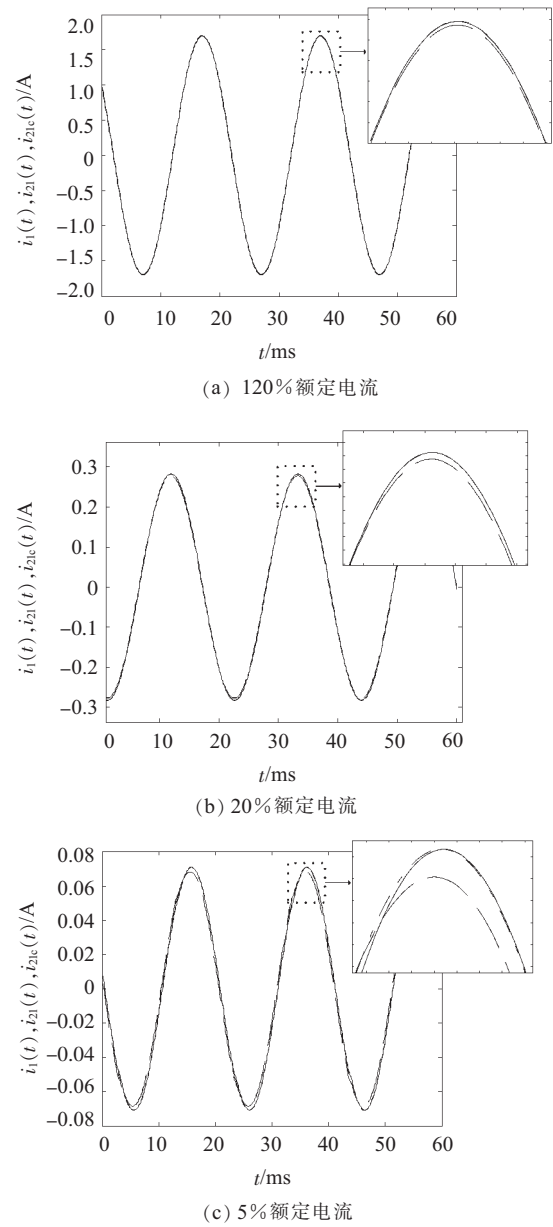


图 5 原边电流 $i_1(t)$ (实线)、副边电流 $i_{21}(t)$ (虚线) 和补偿后副边电流 $i_{21c}(t)$ (点划线) 对比

表 1 补偿算法仿真结果

额定 电流 / %	补偿前		补偿后	
	比差 / %	角差 / ′	比差 / %	角差 / ′
120	-0.55	41.86	0.031	0.05
100	-0.63	25.30	0.020	1.00
20	-1.77	70.76	0.044	1.73
5	-2.30	213.75	0.780	12.44

4 实验验证

为了验证该补偿算法,在一个真实的测量用

CT 上进行了一系列实验, 实验中 CT 的变比为 5 A/10 mA, 额定负载为 100 Ω , 使用丹迪克公司的 DK-51B1 便携式三相交直流标准功率源作为电流信号源, 信号的采样率为 12 800 Hz。

120%, 100%, 20%, 5% 额定电流时的补偿结果如表 2 所示, 可以看出, 比差改善了一个数量级以上, 角差也从补偿前的超过 90' 下降到 1' 左右。结果表明, 提出的数字补偿算法在真实的环境下能有效提高测量用 CT 的测量精度。

表 2 补偿算法实验结果

额定 电流 /%	补偿前		补偿后	
	比差 /%	角差 /'	比差 /%	角差 /'
120	-1.47	90.63	0.0236	0.12
100	-1.50	94.44	0.0265	0.93
20	-2.08	129.81	-0.0315	-1.54
5	-3.82	210.92	-0.0771	-2.73

5 结束语

文中提出的数字补偿算法根据测量得到的副边电流计算出铁心中磁通, 再结合铁心磁化特性确定励磁电流并数字补偿到副边电流测量值中, 以更准

确地再现原边电流值。该数字补偿算法的有效性在基于 MTALB 平台的仿真和实验测试中都得到了验证, 结果表明该算法能够改善测量用 CT 的比差和角差。使用文中提出的数字补偿算法可以提高测量用 CT 的精度。

参考文献:

[1] 冯煜理. 电子式电流互感器的特点和存在的问题[J]. 上海电力, 2011, 1(1): 87-90.

[2] SUZUKI Y, HIRABAYASHI A, YAMASAWA K. Analysis of a Zero-flux Type Current Sensor[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1993, 29(11): 3183-3185.

[3] 李春来, 汤晓宇, 黄业安. 高精度微磁通电流互感器的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(11): 51-54.

[4] 李培艳. 基于零磁通的无源单匝穿心式小电流互感器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[5] KANG Y, PARK J, KANG S. An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 116-124.

作者简介:

吕建虎(1987), 男, 江苏盐城人, 研究生, 从事电力系统自动控制研究工作;

胡忠林(1981), 男, 湖北武汉人, 工程师, 从事电力系统自动化设备研发工作。

Digital Compensation Algorithm for Measuring Current Transformer

LV Jian-hu, HU Zhong-lin

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of current transformer (CT), the magnetic material with high permeability and core with large cross-sectional area are usually used to minimize the exciter current. However, the practice will increase CT manufacturing cost. In the paper, a digital compensation algorithm to improve the CT measurement accuracy is proposed. And the exciter current can be calculated and compensated according to the secondary measured current value and the magnetization characteristic of iron core. The effective of the algorithm is verified through simulation and experiment results.

Key words: measure; current transformer; exciter current; digital compensation

(上接第 26 页)

张玉琼(1979), 女, 黑龙江密山人, 工程师, 从事电力系统安全稳定控制系统的研究和工程应用工作。

Applications of Islanding Detection Based on Combined Decision in Microgrid

JIANG Yan¹, ZHANG Yan², ZHANG Zu-li², ZHANG Ji-hong³, ZHANG Yu-qiong⁴

(1. Chongqing Power College, Chongqing 410053, China; 2. Haixi Electric Power Supply Company, Geermu 816000, China; 3. Chongqing Electric Power Dispatching and Communication Center, Chongqing 400053, China; 4. Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The principles and properties of the three islanding detection methods, including abrupt voltage phase change, frequency change rate and capacitor initiative switch are analyzed. Then a combined decision islanding detection method is presented with passive detection as the main part and active detection as the auxiliary part. Simulation results show that the comprehensive method can eliminate the dead detection zone of single islanding detection method and realize islanding detection in different microgrid running state and load cases.

Key words: microgrid; islanding detection; abrupt phase change; frequency change rate; capacitor initiative switch; combined decision

状态监测系统中实时数据库的研究

林俊¹, 林敏², 胡华威¹

(1. 江苏西电南自智能电力设备有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:针对智能变电站中状态监测系统的需求,设计适应 IEC 61850 标准应用的实时数据库。数据库采用面向对象的设计,根据 SCL 模型文件中描述的结构,以类似于多叉树的方式在内存中建立实时数据结构,同时将数据库分解成若干独立模块,以完成数据调度、数据压缩、并发控制、查询处理等核心功能。

关键词:状态监测;实时数据库;IEC 61850;面向对象;多叉树

中图分类号: TM769

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)03-0031-03

在智能变电站中,状态监测的综合监测单元采用 IEC 61850 标准与站端系统通信,站端监测系统收集各单元汇总的监测信息,将其存入监测数据库中,所有这些数据有些是连续变化的,有些是离散变化的,变化快慢各异,数据库需要适应这些数据存储的要求,并通过人机界面将处理过的数据集中显示,供设备检修人员使用;另一方面需要将数据对远方集中监测主站发布。一般的商用数据库多是磁盘存储,其数据需要按照一定的交换策略被调至内存缓冲区后才能被存取,在执行时受到磁盘 I/O 的束缚,事务的响应时间受等待延迟、查找延迟等限制,因此在系统中需设计实时数据库,数据库常驻内存,消除了事务处理的 I/O 瓶颈问题,提高了系统的性能和吞吐量,满足实时响应的要求^[1]。

1 实时数据库的需求

实时数据库是指数据和事务都具有定时特性或确定的定时限制的数据库系统,其正确性不仅依赖于逻辑结果,而且依赖于逻辑结果产生的时间,即系统宁可接受在时间限度内的不准确的数据,也不接受超过时间限制的准确的数据。所以数据库一方面要求很强的时效性,即必须在一定的时间内完成数据的传输和预处理,另一方面要求很强的可靠性和吞吐性能,即使在流量很大时,也不能丢失数据。通常实时数据库应满足下列功能需求^[2]:(1) 实时数据处理的高速度和高精度,以保证整个系统的稳定运行;(2) 历史数据存储和压缩,使系统能够存储足够的信息,以备查询、分析;(3) 应用程序开发接口,保证系统的开发和可扩展性;(4) 方便、直观的图形化组态工具,便于客户的操作和监视。

2 实时数据库的设计

为保证实时数据库的运行效率,该系统按地址直接访问的方式建立实时数据库,即通过共享内存数据完成数据的存储,这是最快的可用进程间通信(IPC)形式。在共享内存中构建按地址指针直接访问数据的实时数据库,以满足通信的实时性和可靠性的需求。另外实时数据库需要将数据定时存入历史数据库中以备查询和其他接口使用,历史库利用商业数据库 MySQL 通用、灵活等诸多优点定义和保存所需数据^[3]。因此实时数据处理进程中建立了两级数据存储机制:(1) 内存数据库,保证查询的实时、快速性,但是数据量有限;(2) 使用磁盘的历史数据库,将经过压缩的数据存入历史数据库中,保证数据掉电不丢失,且易于查询和综合分析。

2.1 数据库构建过程

由于采用 IEC 61850 标准通信,为适应数据结构,内存数据库采用面向对象的方式构造,根据 IEC 61850 提供的变电站配置描述语言 SCL 形成的 XML 格式的模型文件,为每个 XML 元素创建对应的对象,由于模型文件采用树状结构编排,因此所有解析后的对象也形成树形结构,所有数据都保存在树的节点中,所有的访问均是针对该树状结构^[4]。该内存数据库采用多叉树的方式构建,首先,分析模型文件,得到第 1 个元素及其子元素,并为该元素及其子元素分别创建对象 p 和 $q_1, \dots, q_n$,其中, n 是子元素的个数;其次,构建多叉树,分别将 $q_1, \dots, q_n$ 设置为 p 的孩子;最后,对于已将创建对象的元素,记其对象为 p ,分析模型文件,得到该元素的子元素,并为其创建对象,不妨仍记为 $q_1, \dots, q_n$,重复第二步,直到文档中所有的元素都创建了对应的对象,构造结束^[5]。构造出的多叉树结构如图 1 所示。

2.2 数据存储过程

系统初始化时,实时数据处理进程将根据 IEC 61850 的模型文件构建内存数据库,同时将数据结

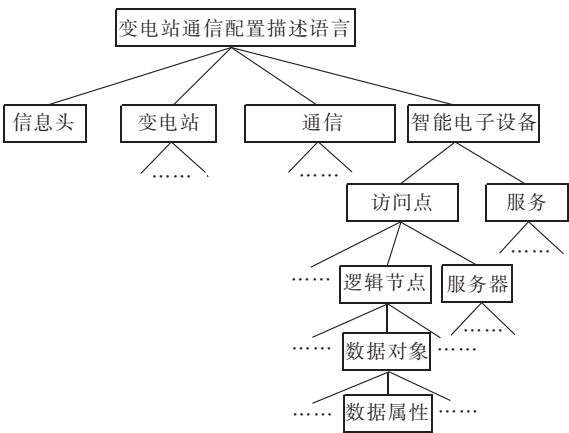


图 1 多叉树结构

构信息通知数据缓存模块，缓存模块为实时数据库模块和历史数据模块，分别开辟数据缓存池，通过通信接口接收各数据点的信息，并将信息同时填入对应的数据缓存结构中。实时数据缓存池根据共享内存数据库提供的操作指针，直接将数据放入内存库中，提供给在线运行模块使用；历史数据缓存池接收数据后首先经压缩模块，产生实时数据送往历史数据处理模块做二次缓存，待缓存数据窗填满或到达自动转存时间后发送至历史数据库。整个实时数据系统的数据存储过程如下图 2 所示。

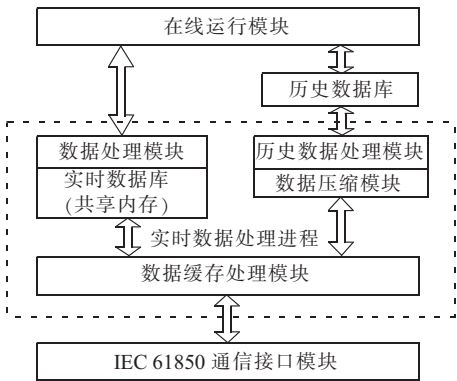


图 2 数据存储过程

在系统运行时，同时要要进行数据采集、数据处理、数据读写和查询、事件报警、历史数据存盘等操作，因此需建立并发控制机制，以满足实时性要求^[6]。

3 实时数据库的实现

3.1 建立内存数据库

系统定义了多叉树节点的数据结构：

```
struct M_APP
{
    short tag;
    union
    {
        M_Folder *folder;    // 集合类型
```

```
M_Object *object;    // 数据对象
M_Point *point;      // 数据属性
M_Var *var;          // 数据值
M_Const *varConst;   // 数据常量
M_MXLink *mxLink;    // 数据配置类型
M_Net *net;          // 网络配置
M_Report *report;    // 报告类型
M_File *file;        // 文件类型
M_Chart *chart;      // 图表类型
};
short childNum;
M_APP **child;
M_APP *parent;
};
```

每种类型的节点都单独定义了数据结构，如 M_Object 为数据对象节点等，在每个节点实例中都分配了一个 ID 号，作为该类型数据节点数组的下标，ID 号根据哈希算法获得，是每个节点的唯一标示，理想的哈希表采用特定的哈希函数能够在记录的存储位置与其关键值之间建立确定的对应关系，使每个关键字和结构中唯一的存储位置相对应，因此通过这个 ID 可以不需要比较便直接取得查找的数据，使用该 ID 建立起来的索引能够提高数据库的访问速度。

由于内存库采用面向对象的思想构建，每种类型节点都是一张独立的表，表间的关联关系采用父、子指针的方式创建，而非关系型数据库的外键关联。

3.2 定义数据库接口

在实时数据处理进程中提供一组接口函数实现对实时数据库的读写、查询和管理等工作。常用接口如表 1 所示。除了定义常用的读取、查询等操作接口外，数据库提供高效的消息通知机制，以便快速将数据变化发布给系统各进程使用。需要消息通知的进程，如告警信息进程，将感兴趣的数据点在实时数据库中进行注册，并给出通知的触发选项，如“数据变化”、“品质变化”等，被注册过的数据点，当发生上述改变时，即刻调用通知接口，将信息发送给需要的各进程，这些接口均由数据处理模块完成^[7]。

3.3 历史数据处理方式

历史数据处理时首先需要经过数据压缩，对于开关类型数据采用变化保存的方式压缩，压缩模块在处理开关量时将其与历史数据处理模块中缓存的最后一个点数据进行比较，若相同则不保存状态，只更新最后一点收到的时间，若不同则产生一条新的缓存数据。对于模拟量数据采用旋转门压缩算法，首先在数据库中为每个数据点设置默认的压缩因子，

表 1 数据库接口

函数类型	函数名	函数说明
void	readAPPMem (M_APP**parentItem, QDataStream & stream, bool deep)	读取父节点 下数据结构
	readBoolMem (QDataStream & stream)	读取 bool 型数据
int	readIntMem (QDataStream & stream)	读取整型数据
M_APP*	findApp(QString id)	通过 ID 搜索数据
QList<M_APP*>	findApp(int dbType)	通过数据结 构搜索数据
bool	setAppValue (QString id,int editType, int index,QVariant v)	设置确定 ID 下, index 索引的值
bool	setAppValue (QString id,int editType, M_APP*editApp)	设置确定 ID 下, 所有索引的值

将收到的数据点与缓存数据中前一个被保留的构成压缩偏移覆盖区域,若区域中没有任何点落在区域以外,则无需保存任何数据,若区域中有任何一点未被覆盖,则将新收到的数据点的前一点保存入缓存,之后以该保存点为起点,继续接收数据,并重复该算法。所谓的压缩覆盖区域实际上是平行四边形,起点为前一个被保存的点,终点是新收到的数据点,其垂直边长为压缩因子的 2 倍,并以数据点为中点;使用压缩算法可以大幅减少数据存储量,保证历史数据库能够长期运行^[8]。

历史数据写入采用 2 级写入控制,即(1) 历史数据模块中为每种数据类型开辟两个缓存窗口,当一个窗口填满时,自动将窗口数据一次性写入历史库,同时清空该窗口,新收到的数据填入另一缓存窗口中;(2) 历史数据库根据系统设置,定时交替读取 2 个缓存窗口,同时清空被读取的窗口,新收到的数据填入另一缓存窗口中。通过该方法可以减少磁盘的读写次数,加快写入效率。

3.4 数据并发控制

针对数据并发控制,实时数据库提供了数据对

象加 / 解锁机制,具有操作权限的进程在使用数据库时首先执行 LOCK 操作锁定指定的对象,从而独占该资源,并在完成后执行 UNLOCK 操作解锁,释放对应的资源。如果该操作进程退出或出现异常,未能按指定时间解锁资源,则实时库将自动释放该资源,以避免数据死锁,保证系统的稳定性。

4 结束语

文中分析了状态监测系统中实时数据库的需求,根据 IEC 61850 标准要求构建了实时内存数据库,并设计了数据库的操作模块,给出了数据库各功能模块的实现方式。通过该方法开发的数据库已用于监测系统软件中,提高了系统的实时性和可靠性,能够适应智能变电站应用的需求。

参考文献:

[1] 傅 蕾,胡敏强. 变电站监控软件系统中内存数据库的研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(10):67-70.

[2] 周 钊.基于实时数据库的历史数据处理技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.

[3] 谈苏伟.电网调度自动化前置子系统实时数据库的设计和实现[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):130-133.

[4] 董 越,孙宏斌,吴文传,等. EMS 中公共信息模型导入 / 导出技术[J]. 电力系统自动化, 2002,26(3):10-14.

[5] 黄建才.基于 IEC 61850 的内存数据库的组织[J]. 福建电脑,2007(6):101-102.

[6] 刘 浩,万 昆. 基于动态链接库 DLL 的实时数据库系统研究与开发[J]. 东北电力学院学报, 2005,25(1):36-39.

[7] 金 舒,戴宏斌,贾志敏. 面向对象的高性能实时数据库 ChRDB[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):88-93.

[8] 陆会明,周 钊,廖常斌. 基于实时数据库系统的历史数据处理[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):127-131.

作者简介:

林 俊(1978),男,江苏南京人,工程师,从事智能变电站相关专业的应用研究工作;

林 敏(1976),女,江苏南京人,助理工程师,从事智能变电站相关专业的应用研究工作;

胡华威(1983),男,浙江金华人,工程师,从事智能变电站相关应用软件的研发工作。

Research on the Real-time Database in State Monitoring

LIN Jun¹, LIN Min², HU Hua-wei¹

- (1. Jiangsu Xidiannanzi Smart Electric Power Equipment Co.Ltd., Nanjing 211102, China;
2. Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: For the requirements of state monitoring system in smart substation, real-time database adaptive to the IEC 61850 standards should be designed. The database applies object oriented design and establishes real-time data structure in the way similar to multi-way tree according to the structure described by SCL model file. Besides, the database are divided into several independent modules, which can complete functions such as data scheduling, data compression, concurrency control, query processing and so on.

Key words: state monitoring; real-time database; IEC 61850; object oriented; multi-way tree structure

太阳能电池接 Boost 电路 MPPT 控制仿真分析

任立平,朱 祁,于跃海,胡 云
(国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘 要:针对实时数字仿真仪(RTDS)/RSCAD 中提供的太阳能阵列模型,测试其 $I-V$ 及 $P-V$ 特性,并外接 Boost 变换电路进行实时仿真。采用恒定电压跟踪法,对太阳能阵列输出的实时电压值与给定值的偏差信号进行 PI 调节,控制升压斩波(Boost Chopper)变换电路的占空比 D ,进而实现太阳能阵列外接电路的等效电阻值的自动寻优。当电阻值达到太阳能阵列工作于最大功率点(MPP)处外接等效电阻 R_{eq} 值时,即实现了太阳能电池阵列最大功率点跟踪(MPPT)控制,从而大大提高了太阳能利用效率。

关键词:太阳能阵列;实时数字仿真仪;最大功率点跟踪;Boost 变换电路

中图分类号:TM914.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2012)03-0034-03

在我国“十二·五”规划中,利用太阳能发电是建设坚强智能电网的重要组成部分。太阳能作为一种最好的可再生能源,必将迎来发展的契机。目前太阳能电池最大功率点跟踪(MPPT)控制算法有很多种,最常用的有:恒定电压跟踪法、扰动观察法和增量电导法等 3 种^[1,2]。文中采用恒定电压跟踪法来实现太阳能电池的 MPPT,实现太阳能电池始终工作在最大功率点(MPP)附近。

1 太阳能电池模型

RSCAD 软件中太阳能电池模型如图 1 所示,是一种基于肖特基二极管的精确太阳能电池组件。该模型以暂态辐射与外界温度作为输入变量,由一系列的太阳能电池构成的组件经串并联后组成的阵列(array),可以方便地设置各个串并联组件数来实现阵列输出的电压、电流。

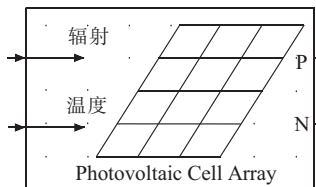


图 1 RSCAD 中太阳能电池模型

该模型中,基本参数如下: V_{ocref} 为单个组件开路电压值; I_{ocref} 为单个组件短路电流值; V_{mpref} 为单个组件在 MPP 处的电压值; I_{mpref} 为单个组件在 MPP 处电流值。假定在标准测试条件下(STC),即暂态辐射强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$,外界温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{ocref}=21.7\text{ V}$; $I_{ocref}=3.35\text{ A}$; $V_{mpref}=17.4\text{ V}$; $I_{mpref}=3.05\text{ A}$ 。

2 MPPT 控制原理

根据实际需要,设计出合理的太阳能电池阵

列,一般外接 Boost 变换电路,使其电压升高,然后接逆变器使其并网运行。文中阐述的太阳能电池阵列外接 Boost 变换电路使其电压升高,并控制太阳能电池阵列工作在 MPP 处,最大限度提高太阳能的利用效率。

设任何时刻太阳能电池阵列端电压与端电流分别为 U_{PV} 与 I_{PV} ,在 MPPT 控制过程中, U_{PV} 与 I_{PV} 均在变化,即 $R_{PV}=U_{PV}/I_{PV}$ 也在变化,从电路匹配角度看,需要一个阻抗变换器。而实际 Boost 变换电路中,电阻 R 是定值,这就需要控制其他变量来调节外接电阻值,达到自动寻优的目的^[3]。太阳能电池阵列工作在 MPP 处时,其输出功率为:

$$P_{PV}=U_{PV}\cdot I_{PV}\tag{1}$$

外接等效电阻为:

$$R_{eq}=U_{PV}/I_{PV}\tag{2}$$

Boost 变换电路中,假设电路中电感 L 值很大,电容 C 值也很大。当开关管处于通态时,电感 L 中的充电电流基本恒定,同时电容 C 向负载供电,保持输出电压 U_o 基本恒定,当开关管处于断态时,太阳能电池阵列与电感 L 共同向电容 C 充电,并向负载提供能量。一个周期内电感 L 储能与释能相等。定义开关管通态时间为 t_{on} ,断态时间为 t_{off} ,开关周期为 T ,开关频率为 $f_s(f_s=1/T)$,设占空比 $D=t_{on}/T$ ^[4]。则:

$$U_{PV}\cdot I\cdot t_{on}=(U_o-U_{PV})\cdot I\cdot t_{off}\tag{3}$$

$$U_o=U_{PV}/(1-D)\tag{4}$$

理想情况下,各开关管损耗为 0,负载电阻 R 消耗的功率为 P_L ,则输出功率等于输入功率,即:

$$P_{PV}=P_L\tag{5}$$

$$U_{PV}\cdot I_{PV}=U_o\cdot I_o\tag{6}$$

可以得到:

$$I_o/I_{PV}=U_{PV}/U_o=1-D\tag{7}$$

定义:

$$R_L = U_o / I_o \quad (8)$$

联立式(2),(7),(8)得:

$$R_{eq} / R_L = U_{PV} \cdot I_o / U_o \cdot I_{PV} \quad (9)$$

$$R_{eq} = R_L \cdot (1-D)^2 \quad (10)$$

(10)式还可以化为:

$$R_{eq} = R_L \cdot (1-t_{on} \cdot f_s)^2 \quad (11)$$

式中: f_s 为开关频率。

由式(11)可以看出, R_L 值不变的情况下, R_{eq} 值与 t_{on} 及 f_s 有关。可见, 保持其中一个变量值不变, 调节另一个变量, 就可实现 R_{eq} 值的自动寻优。文中采用保持 f_s 不变, 调节 t_{on} , 实现 MPPT 控制。

上述分析是在理想情况下进行的, 实际仿真中, 开关管及二极管等都存在功率损耗, 式(10)不严格相等, 仿真出来的 D 值比理想值偏小。

要实现上述外接电阻值的自动寻优, 就要设计出合理的 MPPT 控制电路。MPPT 控制电路如图 2 所示。

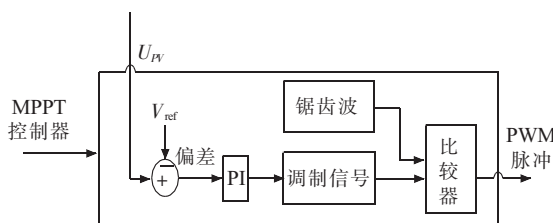


图 2 太阳能阵列 MPPT 控制结构

MPPT 控制器的设计原理如下: 给定直流电压参考值 V_{ref} (一般取为 $0.81U_{oc}$), 此值可以根据上述提供的最大功率点估算方法得出, 误差一般可控制在 3% 以内^[5]。然后与太阳能电池阵列即时电压进行比较, 偏差值经过 PI 调节器处理, 用于控制 PWM 的调制信号, 进而控制 Boost 变换电路中开关管脉冲占空比 D , 使其工作在合适的状态, 进而可以调节太阳能电池阵列的输出电压及电流, 形成闭环控制, 使输出电压稳定在估算出的 MPP 附近。

文中锯齿波幅值为 0.5, 波形关于纵坐标 $y=0.5$ 对称, 这样就保证了 $t_{on}=m$ 。根据 PI 调解原理及上述公式, 有:

$$R = R_L \cdot \{ 1 - f_s \cdot K_p [(U_{PV} - V_{ref}) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (U_{PV} - V_{ref}) dt] \} \quad (12)$$

因为 R_L, f_s, V_{ref} 为定值, 由式(12)可以看出, 太阳能电池阵列外接端电阻值 R 是关于端电压 U_{PV} 的函数, PI 调节器使 U_{PV} 趋于 V_{ref} , 即 R 趋于 R_{eq} , 达到了 MPPT 控制的目的。

3 仿真及结果

利用 RSCAD 仿真软件搭建仿真模型, 模型中

太阳能电池阵列单个组件包含的电池数 $N_c=36$, 并联的组件数 $N_p=5$, 串联组件数 $N_s=10$ 。由 N_p 及 N_s 并与上述提供的估算公式, 可估算出该太阳能电池阵列 MPPT 处的电压值 $V_{mpp}=0.8 \cdot 21.7 \cdot N_s=174$ V, 此值作为 PI 调节器的参考电压值 V_{ref} 。仿真拓扑结构如图 3 所示。

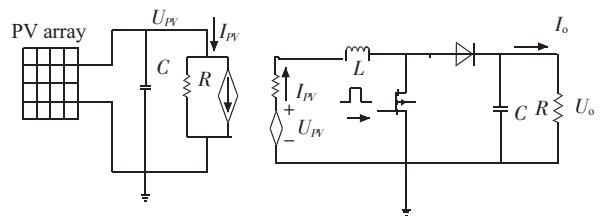


图 3 RSCAD 中搭建的 PV-boost 仿真模型

该仿真是在标准测试条件下进行的。仿真步长为 $12 \mu s$, Boost 电路参数为: $L=0.1$ H; $C=0.01$ F; $R=100 \Omega$ 。PWM 发生器载波信号为锯齿波, 频率为 3 kHz。调制波信号由 PI 调节器控制, PI 调节器参数分别为: $K_p=0.1$; $T_i=0.07$ 。

在 RTDS 中进行仿真, 启动仿真器时刻起, 仿真波形如下图 4、图 5 与图 6 所示。

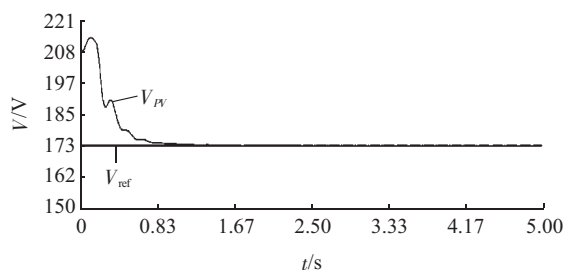


图 4 太阳能电池阵列实时电压及参考电压波形

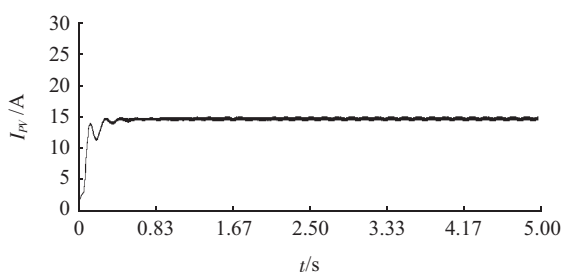


图 5 太阳能电池阵列实时电流输出波形

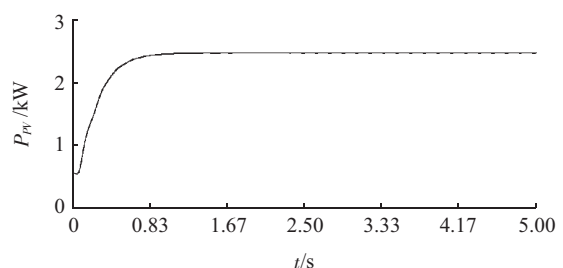


图 6 太阳能电池输出功率波形

太阳能电池从 MPP 初切换到另一个功率点处的仿真波形如图 7 所示, 可以看出, 动态响应速率快, 波形波动小。

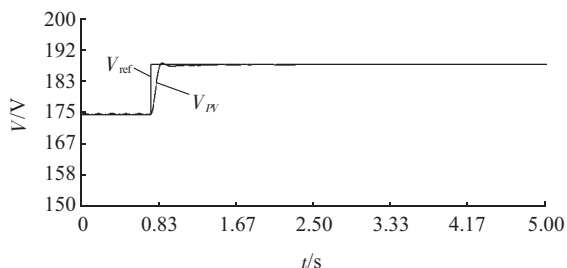


图 7 太阳能电池端电压切换波形

由图 4 可知,仿真开始,太阳能电池的输出电压经历一个下降过程,然后很快稳定在设定值 V_{ref} 附近,达到了 MPPT 控制的目标。从图 4 还可以得出: $U_{PV}=174\text{ V}$; $I_{PV}=15.3\text{ A}$; $P_{PV}=U_{PV}\cdot I_{PV}=2.66\text{ kW}$; 调制信号幅值显示为 0.499 8,即占空比 $D=0.499\ 8$, $U_o=435.2\text{ V}$ 。

可以看出,该仿真成功实现了太阳能电池阵列在 STC 下 MPPT 控制。

4 结束语

恒定电压跟踪法最大的优点是设计简单、跟踪速度快,功率跟踪准确。最大的缺点是由于电压参考值是通过估算得出的,难免会产生误差。在精度要求很高的场合,该方法还有待改进。由于 MPP 的跟踪控制过程实际上是寻找外接电路等效电阻的最优值

过程。从推算出的(11)式还可以看出, R_{eq} 值与 t_{on} 及 f_s 有关。本文是通过控制 D 来实现等效电阻自寻优实现的,即保持 f_s 不变,调节 t_{on} ;若保持 t_{on} 不变,理论上还可以通过控制锯齿波的频率 f_s 来实现 MPPT 的控制。

参考文献:

- [1] 张财志,刘永浩,贾俊波,等.基于 LabVIEW 太阳能电池最大功率点跟踪研究[J].电力电子技术,2009,43(12):8-70.
- [2] 邵 翠,丁 宝,宋镇江,等.光伏系统最大功率点跟踪控制算法的研究[J].建筑电气,2010(6):34-38.
- [3] 范晓聪,方建安.基于模糊 PID 控制的光伏并网发电系统设计[J].机电工程,2010,27(9):104-107.
- [4] 王兆安,黄 俊.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [5] 任立平,董兴绿,于跃海,等.基于 RTDS 太阳能电池建模及最大功率点跟踪控制[J].江苏电机工程,2011,30(5):17-19.

作者简介:

任立平(1985),男,湖南岳阳人,硕士研究生,从事微网的稳定运行研究工作;

朱 祁(1986),男,山东潍坊人,硕士研究生,从事电能质量方面的研究工作;

于跃海(1972),男,江苏泰州人,研究员,从事数字仿真研究工作;

胡 云(1983),男,广西马山人,助理工程师,从事电力系统建模与数字仿真工作。

Simulation Analysis of MPPT Control in Solar Array with External Boost Circuit

REN Li-ping, ZHU Qi, YU Yue-hai, HU Yun

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: For the solar array model in RTDS/RSCAD, the I - V and P - V characteristics are tested and the model is connected to the external Boost transform circuit for real-time simulation. The constant voltage tracking method is applied. In the method, the deviation the real-time voltage value and the given value input to PI adjustment and then the duty cycle of the boost chopper circuit is controlled. In addition, the automatic optimization of the equivalent resistance of the external circuit of solar array can be realized. While the resistance reaches the external equivalent resistance value of maximum power point (MPP), the maximum power point tracking (MPPT) control of solar array is realized and this can greatly improve the efficiency of solar energy.

Key words: solar array; RTDS; maximum power point tracking (MPPT); Boost transform circuit

国外研制出效率 20.2% 的背接触硅基太阳能电池

弗劳恩霍夫太阳能系统研究所(Fraunhofer ISE)日前在背接触太阳能电池的生产工艺中使用了 Rasire 公司的蒸汽发生器,电池的 efficiency 一举突破 20.2%。弗劳恩霍夫已先后在金属卷绕太阳能电池(MWT)及发射极和背面钝化太阳能电池(PERC)的制作工艺中采用了该公司的高纯度水蒸汽发生系统。

Rasire 公司的蒸汽发生器据称可以使用去离子水生产出不含挥发性物质、离子杂质或其他污染物的高纯蒸汽,并应用到太阳能电池生产的关键步骤中。此外,公司还表示通过使用非多孔膜可以有效去除金属、碳氢化合物和其他杂质,使蒸汽纯度提高到 10^{-12} (万亿分之一)级别,并提高蒸汽产量。

基于支持向量机回归的电力系统负荷建模

崔晓祥¹,李 娟²

(1.江苏省电力公司检修分公司,江苏 南京 211102; 2.上海施耐德电力技术有限公司,上海 201200)

摘 要:支持向量机(SVM)是当前一种比较流行的学习机,具有良好的理论背景,从结构风险最小化原则出发以快速寻找到全局最优的特点。针对当前负荷建模的不足,提出了运用 SVM 回归来进行电力系统的非机理负荷建模,并给出了负荷建模的具体步骤。与人工神经网络(ANN)对同一个线路负荷进行建模结果比较表明,基于 SVM 回归的建模效果优于 ANN 的建模结果,证明了运用 SVM 的回归进行电力系统负荷建模的可行性,也为电力系统的负荷建模提供了新的思路和方法。

关键词:电力系统;负荷建模;支持向量机回归;有功负荷;无功负荷

中图分类号:TM714 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2012)03-0037-02

目前负荷建模方法大致可以分为两种:统计综合法和总体测辨法^[1]。这些方法一般都是基于梯度的寻优,很容易陷入局部最优,不能有效地克服建模的非线性和连续性,因而得到的负荷模型与实际模型有较大的差别,在进行仿真时难以得出准确的结果。针对此问题,文中对支持向量机(SVM)在电力系统中负荷建模的应用进行了研究,通过实例表明采用 SVM 进行电力系统负荷建模,不但能描述负荷模型的非线性,且容易得到系统的全局最优解,且收敛速度也比较快。

1 SVM 简介

SVM 是由 Vapnik 在 1979 年最早提出的一种统计学习方法,以其良好的理论背景,从结构风险最小化原则为学习机器提供了一个崭新的角度。

简单地说,SVM 的函数拟合就是用支持向量机对区域中的样本进行回归,由此确定该区域的映射函数,然后根据得到的拟合函数计算该区域中未知样本的取值。为逼近连续函数 $y=f(x)$,用函数集合:

$$f(x,a)=w \cdot x+b \tag{1}$$

式中: w 为权系数; b 为阈值; x 为输入向量。定义损失函数如下:

$$\min L(w,b)=\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i-(w \cdot x)-b|_{\xi} \tag{2}$$

约束条件:

$$(w \cdot w) \leq C \tag{3}$$

式中:约束 $(w \cdot w) \leq C$ 定义了结构风险; (x_i,y_i) 为训练样本; m 为训练样本数目。

ξ 不敏感损失函数,定义为:

$$|y_i-(w \cdot x)-b|_{\xi}=\begin{cases} 0, & \text{if } |y_i-(w \cdot x)-b| \leq \xi \\ |y_i-(w \cdot x)-b|-\xi, & \text{else} \end{cases} \tag{4}$$

上面的问题等价于:

$$\min \Phi(w,\xi,\xi)=\frac{1}{2}(w \cdot w)+C(\sum_{i=1}^m \xi_i^*+\sum_{i=1}^m \xi_i) \tag{5}$$

式中:常数 C 为误差惩罚因子,控制对超出误差的样本的惩罚程度。

2 运用 SVM 进行电力系统负荷建模

在电力系统负荷建模时,一般把电压和频率或者其偏差作为输入量,将有功和无功(或者有功电流和无功电流)或者其偏差量作为输出量。由于电网频率变化相对较小,因此,通常在建模时只考虑负荷功率随电压的变化特性。对于电力系统的有功和无功来说,它们是内在耦合的,但是为了建模的方便,可以将有功和无功进行解耦,分别对其进行建模^[2]。

现在假定从一个给定的电力系统按照时间序列不间断地每隔一个周期采集一个点,该点包括电压、有功、无功数据,共采集 l 个: $\{(u_1,p_1,q_1),\cdots,(u_i,p_i,q_i),\cdots,(u_l,p_l,q_l)\}$,其中 u_i,p_i,q_i 分别为采集的电压、有功和无功值。将无功和有功分别进行建模,假设该系统是一个 n 阶系统,系统输入变量为 $\{(u_1,p_1),\cdots,(u_i,p_i),\cdots,(u_l,p_l)\}$, $\{(u_1,q_1),\cdots,(u_i,q_i),\cdots,(u_l,q_l)\}$ 系统的输出变量为 p_{k+1} 和 q_{k+1} ,以这些输入输出数据为基础,采用一定的算法,找到能够满足 NARMAX 的函数依赖关系:

$$\begin{cases} p_{k+1}=f(s_p(k)) \\ q_{k+1}=f(s_q(k)) \end{cases} \tag{6}$$

引入回归矢量:

$$\begin{cases} s_p(k)=[p(k),p(k-1),\cdots,p(k-n), \\ \quad u(k),u(k-1),\cdots,u(k-n)] \\ s_q(k)=[q(k),q(k-1),\cdots,q(k-n), \\ \quad u(k),u(k-1),\cdots,u(k-n)] \end{cases} \tag{7}$$

则式(6)可表达为:

$$\begin{cases} p_{k+1} = f_{\text{SVM}}(s_p(k), b_p) \\ q_{k+1} = f_{\text{SVM}}(s_q(k), b_q) \end{cases} \quad (8)$$

式中: b_p 和 b_q 为阈值。建模的主要任务就是确定 $f_{\text{SVM}}()$ 和 $f_{\text{SVM}}()$ 以及 b_p 和 b_q 的具体值。

把电力系统负荷建模和自回归向量机的问题提法相比较可以发现, 只要把回归矢量 s_p, s_q 和输出值 p_{k+1}, q_{k+1} 看作 SVM 的训练样本 $(p, u), (q, u)$, 建模过程就是 SVM 的训练过程。因此电力系统的负荷建模完全可以用 SVM 的技术来解决。

3 SVM 在线建模的步骤

运用 SVM 建立电力系统负荷模型的步骤:

(1) 电力系统负荷群模型阶数的确定。对于非线性系统模型阶数, 可以用很多种方法确定, 文中采用损失函数法来确定 (运用此方法得出后面的实例阶数为 3 阶)。

(2) 选择 SVM 核类型及其核参数的确定^[3]。

(3) SVM 的训练。输入训练样本通过求解一个线性约束的二次规划问题, 得到支持向量及其相应权值。对于输入维数很多的情况下, 采用快速算法如 SMO 等特殊的算法, 可以有效地解决回归函数逼近问题。

(4) 模型校验。通过残差的自相关函数和一步预测误差判断模型的有效性, 用不同的测试集进行交叉测试, 如果误差均较小, 则负荷模型可以接受。

4 实例仿真和计算结果的比较

文中对上海市电力公司所属的某变电站下的 2 号出线 (该线路负荷较平稳, 但是时有冲击负荷出现, 因此比较适合检验负荷建模方法的精确性) 所带负荷为建模对象, 以 1 s 为周期, 不间断地采样 300 个点 (包括电压、有功和无功)^[4], 其中前 200 个点作为训练样本, 后 100 个点作为模型校验。根据上述方法, 得出该负荷群模型的阶数为 3, 因此采集的数据的 SVM 输入格式为:

$$\begin{cases} s_p(k) = [p(k), p(k-1), p(k-2), p(k-3), \\ \quad u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)] \\ s_q(k) = [q(k), q(k-1), q(k-2), q(k-3), \\ \quad u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)] \end{cases} \quad (9)$$

负荷建模的 SVM 输入空间为 6 维, 输出空间为 1 维。利用软件包 LIBSVM, 选取的核函数为 RBF, 其中参数 C 选取为 1 000。分别对系统的有功和无功负荷进行训练, 经过训练, 有功负荷建模得到 197 个支持向量, 而无功负荷建模得到 199 个支持

向量, 应用这些 SVM 对负荷进行建模, 并与实际系统的有功和无功输出 (即后 100 点的有功、无功) 相比较, 得出其误差分别为 0.005 8 和 0.001 3^[5]。

为了显示基于 SVM 回归的负荷建模的效果, 运用 ANN 的 BP 算法对此系统进行有功和无功负荷建模^[6], 得到有功和无功的误差分别为 0.050 4 和 0.015 1。从误差的比较可以看出: 相对于 ANN 的负荷建模精度, 基于 SVM 负荷建模精度高出一个数量级。从图 1 和图 2 可以发现, 在线路出现冲击负荷时, ANN 的负荷建模相对于 SVM 有明显的误差, 因此, 基于 SVM 回归的负荷建模是一种非常有效的建模方法。

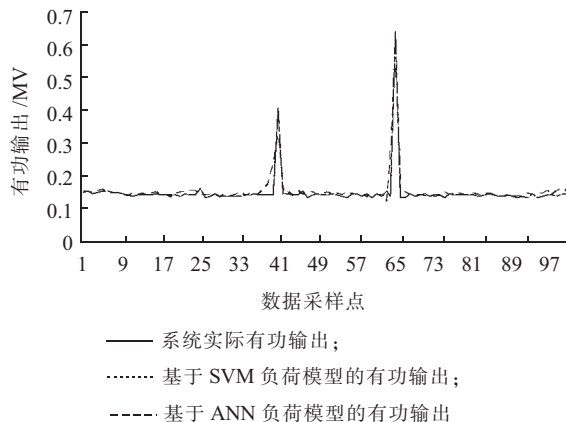


图 1 基于 SVM 和 ANN 负荷建模的有功输出比较

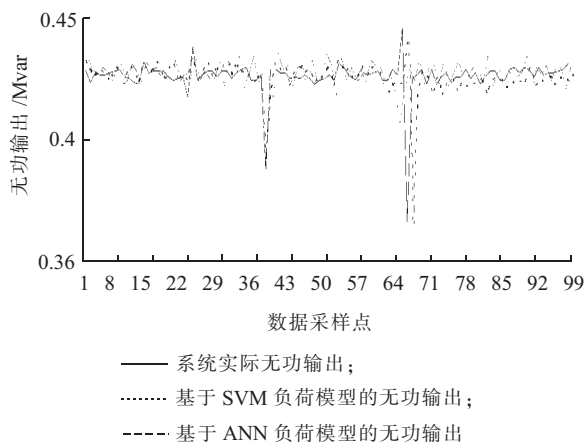


图 2 基于 SVM 和 ANN 负荷建模的无功输出比较

5 结束语

文中将 SVM 用于电力系统负荷建模, 与 ANN 对同一线路的负荷群进行建模。结果表明, 基于 SVM 回归的负荷建模的精度明显优于 ANN 的负荷建模。从而表明了应用 SVM 回归进行负荷建模是一种有效的建模方法, 为负荷建模提供了新的途径。

参考文献:

- [1] 牛东晓, 曹树华, 赵 磊. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

一种新型低压电网动态电压恢复器的仿真分析

吴志坚¹,徐星星²,王宝安²

(1.扬州供电公司,江苏扬州 225009;2.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

摘 要:动态电压恢复器(DVR)具有良好的动态性能,对电网电压波动有着很好的调节作用。提出了一种用于低压电网的新型动态电压恢复器,详细介绍了该 DVR 的工作原理,包括其主电路结构、检测算法和控制策略。并在仿真软件 PSIM 中建立了该 DVR 的详细模型,对电压波动情况下的 DVR 电压补偿过程进行仿真。仿真结果表明,该新型 DVR 具有较理想的动态特性和补偿效果。

关键词:动态电压恢复器;dq 检测算法;无差拍控制

中图分类号:TM761

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0039-04

随着现代工业的不断发展,基于计算机和微处理器的敏感负荷越来越多,对电压质量的要求都较高,即使几个周期的供电中断或电压暂降都将影响其正常工作。另一方面,非线性、冲击性负荷的大量增加,以及电网故障造成的电压暂降、瞬时断电等电能质量问题日益增多,严重影响了生产过程的正常运行,造成巨大的经济损失^[1]。动态电压恢复器(DVR)能补偿电压的暂降、暂升等动态电压质量问题,被认为是当前治理动态电压问题最经济、最有效的装置。我国低压电网都采用三相四线制结构,三相电压不平衡情况较多,针对这种现状,文中提出一种用于低压电网的通过功率单元串联输出补偿电压、采用三单相结构的新型 DVR。

1 DVR 的基本工作原理

DVR 的主要功能是为敏感负荷提供稳定的交流电压,使敏感负荷不受电压暂降、瞬时中断、谐波等电能质量问题的影响。DVR 串联在电源与敏感负荷之间,当负荷正常运行时 DVR 被旁路,由电网提供电压;当电网电压发生电压问题时,DVR 可以在毫秒级内向线路中注入一个幅值、相位可控的串联补偿电压,以确保敏感负荷输入电压的恒定。

常见的 DVR 主要由电压型逆变器、控制单元、储能单元、输出滤波单元和串联变压器组成,其典型主电路结构如图 1 所示。当 DVR 工作时,必然会与系统之间进行能量交换,储能装置就是给 DVR 提供能量的部分,通常有 2 种结构:直接采用储能单元的储能元件和采用整流方式。直接采用储能元件有电容储能、蓄电池储能、超导储能等,这种方式只能在一段时间内对电能质量进行补偿;而采用整流方式的 DVR 可以一直不间断的对电源电压进行补偿,缺点是会给电网带来一定的谐波污染。

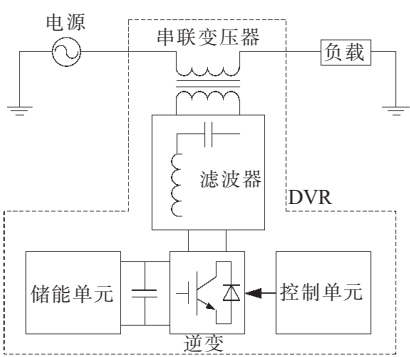


图 1 单向 DVR 的结构

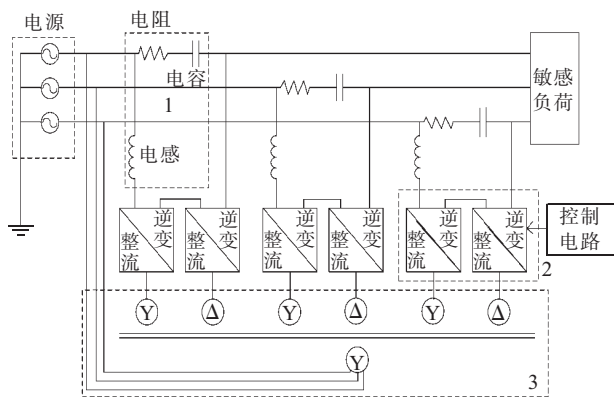
控制单元利用传感器、检测系统检测出电网电压,经过对采集到的数据分析、判断,利用控制环节产生逆变器中功率开关器件所需的脉宽调制 PWM 信号,再由驱动电路控制逆变器中功率开关器件的导通。逆变器主要产生系统所需的补偿电压,补偿电压经过输出滤波单元滤除高次谐波电压后,再由串联变压器或直接通过滤波器电容注入电网,最终产生的补偿电压将抵消电网侧电压波动,确保负载侧输入电压的稳定,提高系统的电能质量。

2 新型 DVR 的工作原理

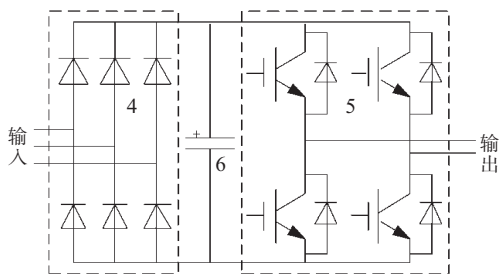
2.1 主电路结构

DVR 从补偿方式上看可分为 2 类:基于线电压补偿且各相相互关联的线电压补偿型 DVR 和基于相电压补偿且各相相互独立的相电压补偿型 DVR。DVR 从逆变器拓扑的结构上来看主要有:三相桥结构、三相四线结构和三单相结构。针对我国低压电网现状,用于低压电网的 DVR 通常采用补偿电容器与系统串联的方式,这种方式也更符合工程的实际应用。文中提出一种新型的用于低压电网的三单相结构的相电压补偿型 DVR,其主电路如图 2 所示。

该新型 DVR 采用三单相结构,分别对每相电压进行补偿,主要包括 LC 滤波器、功率单元模块、控制电路和移相变压器 4 个组成部分。首先检测出电



(a) DVR 的主电路结构



(b) 功率单元电路结构

1 为 LC 滤波器;2 为功率单元模块;3 为移相变压器;4 为二极管三相整流电路;5 为 IGBT 构成的三相逆变电路;6 为电解电容

图 2 新型 DVR 主电路结构

网电压信号,然后通过控制电路得到各个功率单元逆变电路的开关器件绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的脉宽调制(PWM)驱动信号,控制 IGBT 的导通,使功率单元模块输出所需要的补偿电压,并经 LC 滤波器滤除高次谐波电压后与电源电压串联,从而保证敏感负荷输入电压的稳定。

DVR 与系统的耦合方式有 2 种,即串联变压器耦合和电容耦合。耦合变压器可以降低 DVR 电压等级,隔离系统与 DVR 装置,但是变压器的存在会增加逆变器的容量,也可能给控制的精度和稳定性带来负面的影响。因此,在电压等级较低的应用中可以考虑省去串联变压器。文中的 DVR 采用电容耦合方式,用工频变压器隔离直流侧和电网。

每个功率单元模块由 2 个功率单元逆变电路输出串联而成,每个功率单元由 6 个二极管组成的三相整流电路通过电解电容连接到 4 个 IGBT 和 4 个二极管组成的单相逆变电路构成。该模块中的 2 个逆变电路开关器件 IGBT 的驱动信号错开一定角度,使逆变输出电压波形毛刺减少,从而降低 LC 滤波器中电感的要求。此外,2 个功率单元的串联省去了传统方式中的串联变压器,降低了装置成本,可靠性相对较高,不存在传统器件串联引起的均压问题。

6 个功率单元分别由移相变压器的 6 个二次侧绕组供电。移相变压器有 1 个一次侧星形绕组和 6

个二次侧绕组,其二次侧绕组中 3 个为星形联结,其他 3 个为三角形联结,每个二次侧绕组分别移相一定的角度给 6 个功率单元的 6 脉波二极管整流供电。移相变压器的采用实现了其一次侧、二次侧线电压的相位偏移,使得由于整流而产生的谐波折算到移相变压器一次侧时相互抵消,从而消除整流产生的谐波对电网的影响。此外,移相变压器不仅实现功率单元与电源间的电气隔离,还使每组功率单元的主回路相对独立,彼此间相互绝缘,互不影响。当某个功率单元出现故障时,可自动退出系统,而其余的功率单元可继续保持运行,减小停机时造成的损失。

2.2 DVR 的检测算法

电压幅值和相位实时、准确的检测是 DVR 的关键。常见的检测算法主要有:有效值法、峰值电压法、 dq 变换和小波变换等^[2]。这些检测算法大多基于频域分析,只有 dq 变换法实时性较高,其余算法需要的采样数据量很大,实时性较差。因此在对实时性要求较高的 DVR 检测中通常都采用 dq 变换。

传统的 dq 变换以三相对称系统为基础,能实时、快速、准确地检测出三相对称系统的电压跌落。而低压电网中电压跌落多为单相事件,三相不对称居多,此时负序分量较大,传统的 dq 变换不能准确提取出电压基波正序分量,检测精度受到影响。因此,文中采用改进的 dq 检测算法(如图 3 所示),用于提取三相不对称系统的电压基波正序分量,滤除负序分量转化带来的二次谐波^[3],同时消除低通滤波器带来的延时,提高 DVR 检测的实时性。

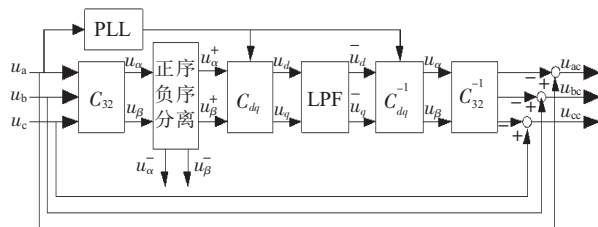


图 3 改进的三相 DVR 检测方法

这种改进的 dq 检测算法实质是:(1) 先将三相电网电压由三相静止坐标系变换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系,如式(1)所示;(2) 通过最小二乘法建立方程分离出 u_α, u_β 的正序分量,接着将分离出的正序分量 u_α^+, u_β^+ 进行 dq 变换,如式(2)所示;(3) 使用低通滤波器滤除其他频次的分量,得到由基波正序分量转换后的直流分量;(4) 将得到的直流分量进行 dq 变换和 $\alpha\beta$ 变换的逆变换即可得系统基波正序分量。

$$u_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C_{dq} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}, C_{dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ -\sin\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: θ 为 d 轴与 α 轴之间的夹角。计算出的基波正序分量的有效值和相位分别为:

$$\begin{cases} U = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \\ \Phi = \arctan \frac{U_q}{U_d} \end{cases} \quad (3)$$

改进的三相 DVR 检测方法, 在确保检测精度的情况下, 减少了计算量, 有效地提高了 dq 变换在三相不对称情况下的实时性。

2.3 无差拍控制策略

随着高性能数字信号处理器(DSP)的出现, 一些先进的控制策略随之产生: 如空间矢量控制、滞环比较控制、无差拍控制、模糊控制、重复控制、神经网络控制等等^[4]。文中采用无差拍控制策略, 该控制策略是在滞环比较控制技术的基础上发展起来的一种全数字化控制技术, 至今已发展成一种较为理想的输出电压瞬时值控制技术。

该新型 DVR 逆变器的无差拍算法流程如图 4 所示, 其中: u_{caf} 为输出电容电压; i_{La} 为负载电流; u_{ref} 为输出电压参考值。

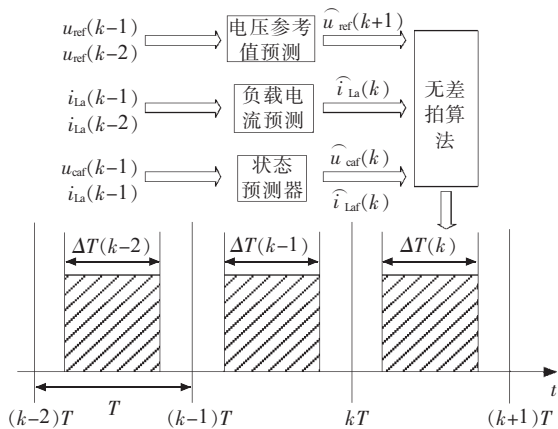


图 4 无差拍算法流程

无差拍控制策略的本质是由 DVR 逆变系统(包含滤波器)的状态方程和输出反馈信号推算出下一个开关周期的脉冲宽度^[4]。这样就能确保各个采样时刻输出的电压值与给定的参考值精确相等, 任何由负载引起的输出与给定的偏差, 都能在 1 个开关周期内得到校正。无差拍控制具有消除稳态误差、快的暂态响应以及控制精度高等优点。

3 仿真分析

为了验证新型 DVR 的性能, 特对其进行了仿

真分析, 其主电路如图 2 所示。先将系统参数作如下设计: 输入相电压额定有效值 $U=220\text{ V}$, 电网基波频率 $f=50\text{ Hz}$, 逆变器 IGBT 开关频率为 10 kHz 。在时间 $t=0.5\sim 0.6\text{ s}$ 之间注入 30% 的 5 次谐波和 30% 的电压骤降, DVR 的运行结果如图(5—8)所示。

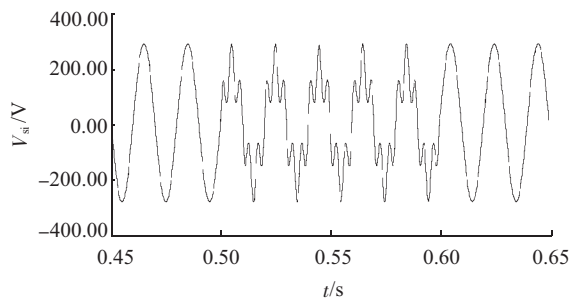


图 5 a 相电网电压 V_{sa} 波形

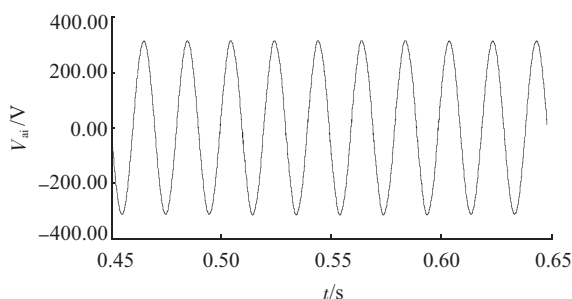


图 6 a 相负载电压 V_{la} 波形

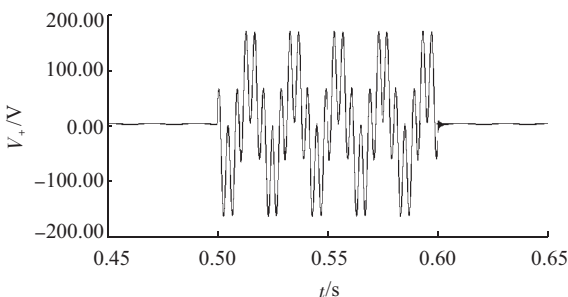


图 7 a 相补偿电压 V_s 波形

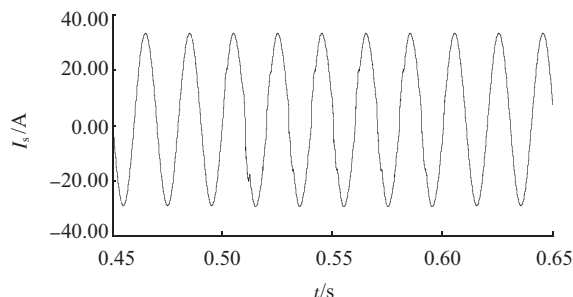


图 8 a 相电网电流 I_s 波形

可见, 该新型 DVR 具有良好的补偿特性; 在 DVR 工作期间, 即 $0.5\sim 0.6\text{ s}$ 之间, 电网侧电流波形接近正弦, 表明 DVR 的功率单元模块中的整流并未对系统电网造成谐波污染。

4 结束语

文中提出一种新型的用于低压电网电压稳定的实时 DVR, 其采用三单相结构、一种改进的 dq 检测

算法和无差拍控制策略,通过移相变压器从电网获得DVR的能量,再通过功率单元的串联输出所需要的补偿电压。在三相平衡和不平衡时都能对系统电压进行很好的补偿,且消除了DVR中的储能元件整流方式引入的谐波影响,同时降低了对LC滤波器中电感的要求,具有较高的实时性和可靠性、良好的动态性能和补偿效果等优点。这种新型DVR控制简单,易于实现,其缺点是采用了较多的功率开关器件和较贵的移相变压器,成本较高。

参考文献:

[1] 周 静,韦统振,赵艳雷,等.低压配电网中单相动态电压恢复器与电力系统之间的能量流动[J]. 电力自动化设备, 2010,30(4):26-30.

[2] 张国荣,丁 明,梁海涛,等.一种应用于单相 DVR 的检测算法与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(4):732-734.
[3] 杨新华,郭志成.动态电压恢复器电压跌落检测[J].低压电器,2011(5):51-54.
[4] 马振国,李 鹏,赵保利,等.DVR 电压波形跟踪无差拍控制方法[J].电力自动化设备,2005,25(3):13-17.

作者简介:

吴志坚(1979),男,江苏扬州人,工程师,从事电力系统运行管理工作;
徐星星(1987),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为电能质量;
王宝安(1978),男,江苏扬州人,讲师,从事电能质量方面的研究工作。

Simulation and Analysis of A New Type DVR for Distribution Network

WU Zhi-jian¹, XU Xing-xing², WANG Bao-an²

(1. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Dynamic voltage restorer (DVR) has good dynamic performance and well regulating function for grid voltage fluctuation. A new type DVR for distribution network is proposed in the paper. And the principle of the new DVR is introduced in detail, including its main circuit structure, detection algorithm and control strategy. Besides, the detailed DVR model is established in PSIM, and simulations of DVR voltage compensation with grid voltage fluctuation are carried on. Simulation results show that the new type DVR has ideal dynamic characteristic and compensation effect.

Key words: dynamic voltage restorer (DVR); dq detection algorithm; dead beat control

(上接第 38 页)

[2] 李元诚,方廷健,于尔铿.短期负荷预测的支持向量机方法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6):55-59.
[3] 谢 宏,魏江平,刘鹤立.短期负荷预测中支持向量机模型的参数选取和优化方法[J].中国电机工程学报,2006,26(22):17-22.
[4] 姜惠兰,刘晓津,关 颖,等.基于硬 C 均值聚类算法和支持向量机的电力系统短期负荷预测[J].电网技术,2006,30(8):81-85.
[5] 牛东晓,贾建荣.改进 GM(1,1)模型在电力负荷预测中的

应用[J].电力科学与工程,2008,24(4):28-30.

[6] 康重庆,夏 青,沈 瑜,等.电力系统负荷预测的综合模型[J].清华大学学报:自然科学版,1999,39(1):8-11.

作者简介:

崔晓祥(1979),男,江苏兴化人,工程师,从事电力系统运行、检修工作;
李 娟(1977),女,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统运行、研发工作。

Load Modeling Based on SVM in Power System

CUI Xiao-xiang¹, LI Juan²

(1. Maintenance Branch of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211102, China;

2. Shanghai Schneider Electric Technology Co.Ltd., Shanghai 201200, China)

Abstract: Currently, the support vector machine (SVM) is used widely for its good theoretical background and optimizing characteristic based on structural risk minimization principle. For the deficiency of current load modeling, a non-mechanism load modeling method based on SVM regression is put forward and the specific steps of load modeling are also provided. Compared with the modeling results of the same line load using artificial neural network (ANN), the load modeling results using SVM regression is better. Thus, the feasibility of the proposed load modeling method based on SVM is proven, which is also the new idea and method for load modeling in power system.

Key words: power system; load modeling; support vector machine (SVM) regression; active load; reactive load

屋顶太阳能光伏发电系统的设计

李宁峰,于国才
(国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘 要:新能源利用是我国七大战略性新兴产业之一,太阳能光伏发电是新能源利用的重要领域。介绍了小型屋顶光伏发电系统的设计过程及其应用前景,为小型光伏发电系统设计提供了全套解决方案。该方案实施的屋顶光伏发电系统为后续大型光伏发电系统的设备研制、挂网实验提供了有力的技术支撑,也为巨型光场电站设计提供了实践经验。

关键词:太阳能组件;光伏发电;并网

中图分类号:TM615 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2012)03-0043-03

太阳能光伏发电作为国家重点推广的节能技术,在今后几年将取得快速发展。太阳能光伏发电系统有离网光伏发电系统和并网发电光伏系统 2 种形式^[1]。离网光伏发电系统常用于边远地区的村庄供电、微波中继站电源、太阳能路灯系统等独立电源场合,配有蓄电池,可以保证供电的连续性。并网光伏发电系统是指可并网运行的光伏发电系统,包括带蓄电池和不带蓄电池 2 种方式。带有蓄电池的并网发电系统具有可调度性,常安装在民用建筑上;不带蓄电池的并网发电系统不具备可调度性,常用于大型发电系统。基于对后续的大型光伏发电系统设计、运行提供技术支持和实验条件支撑,文中的光伏发电系统设计采用了离网与并网相结合的形式,可视工作需要切换。

1 太阳能光伏发电系统构成

太阳能光伏发电系统通常由光伏组件、组件支架、防雷系统、直流配电柜、光伏逆变器、交流配电柜、并网变压器等组成,如图 1 所示。

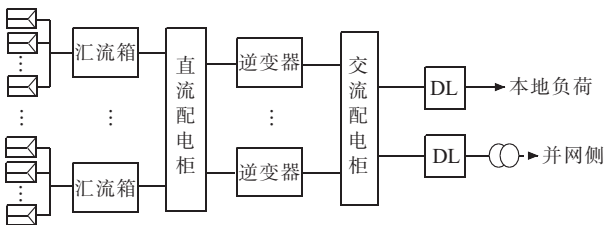


图 1 太阳能光伏发电系统组成原理

系统中将光伏组件及支架按屋顶自然条件进行合理布置,形成屋顶光伏阵列,用于太阳能的获取及光电转换,然后根据屋顶光伏系统的特点将光伏组件进行合理串并联后,接入防雷汇流箱,根据光伏逆变器的容量配置分路接入直流配电柜,就完成了光伏直流电源的汇集过程。直流配电柜的出口按额定功率匹配接入并网逆变器,经过逆变器将直

流电流转换为并入电网的交流电流,如逆变器的输出电压和并网电压不相等,就需要经过变压器转换为同步的交流电压后再并入电网。

2 太阳能光伏发电系统设计

2.1 光伏组件的选型

光伏组件按光电池材料不同可分为晶硅组件、薄膜组件及聚光组件。

晶硅组件又细分为单晶组件、多晶组件、高效多晶组件,其光电能量转换效率在 15%~20%之间,整体性价比较高,是目前应用最为广泛的太阳能光电转换材料。

薄膜组件具有生产成本低、便于大面积连续生产、可制成柔性卷曲形状等特点。目前已能产业化大规模生产的薄膜太阳能电池主要有硅基薄膜电池、铜铟镓硒薄膜电池(CIGS)和碲化镉薄膜电池(CdTe)。薄膜电池转换率在 6%~8%之间,转化率不高是制约薄膜电池组件发展的技术瓶颈。

聚光组件的优势在于其采用廉价的光学材料来代替昂贵的硅电池材料,且转换效率可达到 40%,远高于普通太阳能电池。不足之处是该电池组件需要冷却装置,聚光镜体积较大,整体价格较高。

综上所述,按经济、可靠、易扩展的原则,设计拟采用晶硅组件。采用相同功率、不同材料的晶硅组件在同一环境下进行比较试验。3 个月的试验显示,单晶组件的发电量最高,多晶组件稍低,高效多晶组件接近单晶组件,试验数据如表 1 所示。

表 1 不同材料光伏组件发电性能比较

月份	月均温度 /℃	发电量 /(kW·h)		
		单晶	高效多晶	多晶
1	1.9	16.6	16.3	14.9
2	3.0	18.9	18.7	17.5
3	8.4	19.6	19.4	18.6

目前单晶组件的价格最高,其次为高效多晶组

件和多晶组件。考虑性价比及设计目的,该设计采用多晶组件作为光伏发电系统的光电转换器件。选用的组件外形尺寸为 1 665 mm×991 mm×50 mm,单组功率为 220 W,具体组件参数如表 2 所示。

表 2 设计选用的多晶组件技术参数

项目	参数
最优输出电压 /V	29.6
最优输出电流 /A	7.61
低温开路电压 /V	36.7
短路电流 /A	8.15
最大功率 /W	225
模块效率 /%	13.6
工作温度 /℃	-40~+85
晶片尺寸 /mm	156×156
晶片数量 /片	6×10
质量 /kg	19.8

2.2 光伏阵列的布局设计

2.2.1 确定光伏阵列的最佳倾角

并网光伏发电系统中,最佳倾角是指能获得全年最大光辐射量的组件倾角,通过调整组件的放置支架得到。光伏组件支架有可变倾角和固定倾角 2 种形式。可变倾角适用于大型光伏发电系统;固定倾角支架相对较为简单,一般按能获得全年最大辐射量的组件放置角度来制作。该设计规模较小,主要用于光伏发电系统的研究与验证,故文中采用固定倾角方式的支架。根据相关文献^[2],南京地区正南向坡面的分月总辐射最佳倾角随季节变化而各不相同。全年各月最佳辐射倾角的平均值为 26.4°,将该角度设定为放置光伏组件支架的水平倾角。

2.2.2 确定光伏组件阵列间距

光伏阵列间距的确定原则是冬至日当天 9:00 至 15:00,光伏阵列不会相互遮挡,一般按以下方式确定最小间距。

首先按式(1)和式(2)计算出南京地区太阳高度角 α 和方位角 β ^[3]。

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \tag{1}$$

$$\sin \beta = \cos \delta \sin \omega / \cos \alpha \tag{2}$$

式中: φ 为纬度,南京为北纬 32.4°; δ 为太阳赤纬,冬至日为-23.5°; ω 为时角,9:00 时角为 45°。通过计算可得: $\sin \alpha = 0.333\ 8$,可知南京地区太阳高度角 α 为 19.5°; $\sin \beta = 0.633\ 4$,可知南京地区太阳方位角 β 为 39.3°。然后由式(3)确定阵列间距:

$$D = \cos \beta \times H / \tan \alpha \tag{3}$$

式中: D 为阵列间距; H 为阵列高度。因采用固定倾角的支架,由表 2 已知组件长度为 1.665 m,南京地区光伏最佳倾角为 26.4°,阵列高度为: $H = 1.665 \times$

$\sin 26.4 = 0.74\ \text{m}$,可算得阵列间距 D 为 1.6 m。

因此,光伏阵列支架应按 1.6 m 的间距来布置,以达到在取得最佳光伏倾角的同时,最大限度地利用有限屋顶面积资源的目的。

2.2.3 光伏组件阵列的布置

设计中可供布置光伏发电系统的楼顶有效面积为 7 500 m²,长约 60 m,宽约 15 m,综合考虑光伏组件外形及间距,可以由南向北摆放 5 行组件,每行 50 片,共可放置 250 片功率为 225 W 的多晶光伏组件,总功率约 56 kW。组件布置设计时,要考虑屋面承重、防水,组件抗风、防雷等问题^[4]。该设计采用不锈钢支架将所有组件连接为一个整体,固定在屋面承重梁上,架体分段与屋面防雷带相连,解决了承重、防水、抗风、防雷等问题。

2.3 光伏逆变器的选型及分组匹配

设计中采用 SG 20KTL 并网光伏逆变器,其部分电气参数如表 3 所示。

表 3 并网逆变器 SG 20KTL 电气参数

项目	参数
满载 MPP 电压范围 /V	380~800
最低输入电压/V	250
启动电压/V	270
最大直流功率(峰值)/kW	22
额定输出功率/kW	20

因每片光伏组件输出电压只有 29.6 V,远低于逆变器需要的直流输入电压,所以必须适当串联才能满足逆变器对输入电压的要求。串联的原则是最高温度时最佳工作电压不低于光伏逆变器的 MPPT 最小电压,否则会出现功率失真;最低温时开路电压不能高于光伏逆变器的最大输入电压,否则可能会损坏逆变器。结合所选光伏组件的相关参数,可以确定光伏组件最大和最小串联数。

组件最小串联数 = 逆变器最小输入电压 / 组件高温最优输出电压 = 380/ 29.6 = 13; 组件最大串联数 = 逆变器最大输入电压 / 组件低温开路电压 = 800/ 36.7 = 21。

逆变器选定后,可确定组件的串联片数应在 13~21 片之间,串联后组件满足了逆变器对输入直流电压的要求,还必须将多路串联组件再进行合理的并联,使组件总功率达到逆变器的设计功率,减少逆变器的资源浪费。

该设计中,组件总功率约 56 kW,逆变器额定输出功率为 20 kW,需将组件平均分为 3 组接入 3 台逆变器,结合组件的屋顶布置情况,及逆变器的功率匹配设计,对原来按面积布置确定的组件数量进行了微调,最终确定该光伏发电系统实际组件总数为

240 片,总功率 54 kW。每台逆变器接入 80 片组件,分为 5 个串联组,每组 16 片组件串联,工作电压为 473.6 V,输入功率为 18 kW。

2.4 屋顶光伏发电系统的组成

屋顶光伏组件的输出电流经汇流箱、并网柜、逆变器后,可直接作为电源驱动负荷。亦可切换到外部三相电网,实现小型光伏并网系统的运行。为保证系统安全可靠运行,还需要综合设计防雷系统、保护系统、测控系统等配套设施,如图 2 所示。

2.4.1 防雷系统设计

雷电主要有直击雷和感应雷 2 种。直击雷是指直接落到太阳能电池阵列、电气设备等上面或附近的雷击,防直击雷主要依靠避雷针。该系统处于屋顶四周女儿墙的下方,设计采用将光伏系统的所有钢结构与屋顶的防雷网相连,以达到防直击雷的目的。感应雷主要由电磁感应或静电现象产生,感应雷产生的电磁浪涌会损坏电气设备,甚至引起火灾,根据 SJ/T1127 的相关规定,该系统通过在直流接口设备、并网逆变器、交流配电柜的各输入端口设置浪涌保护器来防护侵入系统的感应雷电。

2.4.2 保护及测控系统配置

该设计采用的逆变器具有 RS232/RS485 和以太网通信功能,系统的电流、电压、发电量等参数可以由通信方式实时获得,该逆变器还具有对系统直流、交流两侧开关的手动/遥控分断和保护功能,以及先进的孤岛效应检测和防护功能。逆变器保护范围以外,如汇流箱的输入开关、并网变压器开关等设备,设计中也配置了断路保护器、状态监视器等设施,从而保证了全系统的安全稳定运行。

3 结束语

按方案建设的屋顶太阳能发电系统已正式运行,月均发电量约 6 000 kW·h,系统负荷切换正常,系统相关防雷、保护、电气测量等指标均达到了设计要求,为建筑内蓄电池组和照明用电提供了环保的清洁能源。该屋顶发电系统的建设实施,为今后大型太阳能并网发电系统的研究、设计积累了经验;也为太阳能光伏系统相关的计量、控制、保护装置挂网运行提供了便利条件;还在防雷系统设计、支架设计等相关方面获取了宝贵的实践经验。

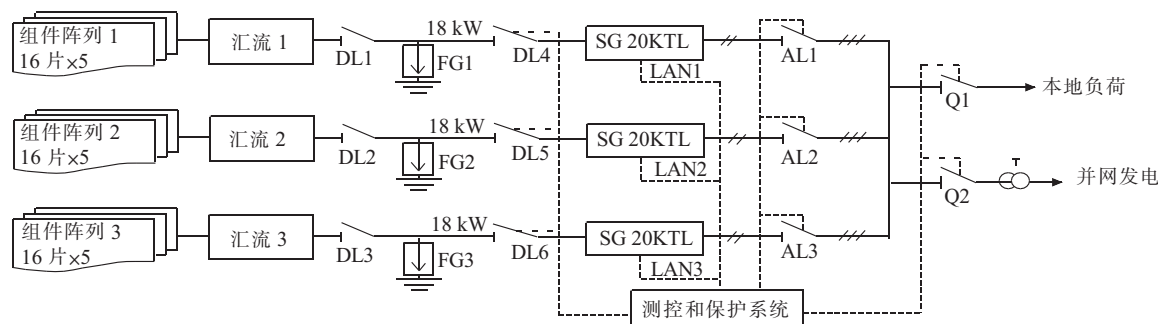


图 2 屋顶光伏发电系统的组成结构

参考文献:

- [1] 王长贵,崔荣强.新能源发电技术[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 朱超群.南向坡面总辐射最佳倾角的表示式[J].南京大学学报:自然科学,1997,33(4):623-629.
- [3] 王春明,王金全.天和家园 43 kW 屋顶并网光伏发电系统设计[J].建筑电气,2007(2):13-18.
- [4] 喜文华.太阳能实用工程技术[M].北京:化学工业出版社,

2001.

作者简介:

李宁峰(1969),男,福建厦门人,高级工程师,从事电力系统及自动化研究工作;
于国才(1972),男,黑龙江齐齐哈尔人,工程师,从事电力系统及自动化研究工作。

Design of the Photovoltaic Roof Power Generation System

LI Ning-feng, YU Guo-cai

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: New energy application is one of the seven strategic new industries in China, and the solar photovoltaic power generation is an important field of new energy. In the paper, the power design process and application prospect of the small-size photovoltaic roof power generation system are introduced in detail. And the whole set of solutions for small-size photovoltaic roof power generation design is also presented. The implementation of photovoltaic roof power generation can give support for the equipment development and experiment of large-scale photovoltaic and also valuable experience for the design of giant photovoltaic power plant.

Key words: solar energy component; photovoltaic power generation; grid-connected

智能变电站过程采样值传输协议的分析与程序实现

徐瑞林¹,高 晋¹,杨洪涛²,钟加勇¹,张友强¹
(1.重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123;2.国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘 要:智能变电站是变电站发展的趋势,而智能变电站过程层采样值传输协议,是将非常规互感器采集到的电力一次系统的运行数据传输给保护装置和监控装置,这些数据的正常传输是保护装置和监控装置完成其各自功能的基础。详细介绍了智能变电站过程层的 3 种采样值传输协议,从灵活性、实时性、可靠性等方面比较了其优缺点,并给出了实现这 3 种协议的编程方法。

关键词:智能变电站;过程层;采样值传输协议;IEC 61850;IEC 60044-8

中图分类号:TM762**文献标志码:**B**文章编号:**1009-0665(2012)03-0046-04

IEC 61850 系列标准的应用促进了常规变电站发展为智能变电站。智能变电站几乎完全改变了常规变电站的通信方式,尤其对于过程层而言,智能变电站采用非常规互感器,互感器的输出就已为数字量,只需通过网络将互感器所采集到的数据发送给监控和保护装置,便能完成其功能。这种由常规变电站到智能变电站的过程层变化,最大的优点是提高了互感器测量一次系统电压和电流的准确度;其次简化了过程层的接线,提高了变电站自动化系统的可靠性,智能变电站中只需要使用光纤或者网线将过程层装置连接起来使之能通信即可,而常规变电站过程层中存在模拟量的传输,导致监控和保护装置要接入许多导线。IEC 61850 标准第 9 部分(包括 9-1 和 9-2)^[1,2]以及 IEC 60044.8 标准都规定了过程层合并单元传输采样值时应采用的协议。合并单元将从非常规互感器获取到的电压和电流采样值数据以上述 3 个标准中所定义的格式组装出报文,便可以传输采样值数据给支持上述标准的监控和保护装置。

1 智能变电站过程层各种协议介绍

电压和电流采样值是监控和保护装置的数据来源,通过对采样值的分析和处理完成装置自身的功能。采样值传输的是电压和电流的瞬时值,其特点是数据量巨大,目前常用的电压和电流采样率为每周波 80 点,因此每秒钟就有 4 000 个电压和电流采样,若每个数据包中仅含有 1 个应用服务数据单元(ASDU),则合并单元每秒钟便有 4 000 包数据发送给智能装置。

1.1 IEC 61850-9-1 协议

IEC 61850-9-1 协议是基于以太网定义的,以 MAC 地址标识不同的装置,为提高数据传输速率,

其表示层、会话层、传输层和网络层均为空^[1]。详细格式如图 1 所示。



图 1 IEC 61850-9-1 协议格式

IEC 61850-9-1 协议格式总体上比较固定,由两大部分组成。第一部分为标准的以太网协议头,字节数恒定,共占 26 字节;第二部分为 IEC61850-9-1 协议的应用协议数据单元(APDU),字节数可变,且采用 ASN.1 编码。

IEC 61850-9-1 协议的 APDU 部分采用 ASN.1 规则编码,即编码成 TLV(Tag, Length, Value)3 个部分:其 Tag 占 1 个字节,恒定为 0x80;其 Length 字节数不定,取决于后面的 ASN.1 的 Value 部分的长度,一般占 1~3 字节,含义是 Value 部分的长度;其 Value 以 Octet String (8 位位组)格式编码,包含 ASDU 数目和 ASDU 详细列表,字节数不定。

IEC 61850-9-1 协议的 APDU 中包含的 ASDU 不再采用 ASN.1 规则编码,格式一般采用基于 IEC 60044-8 标准中定义的通用数据集,如图 2 所示。

可见,IEC 61850-9-1 协议的 ASDU 格式固定,总共占有 46 字节,包含 12 个通道的数据(2 组电流、1 组电压和其他电压电流量)。ASDU 状态字会

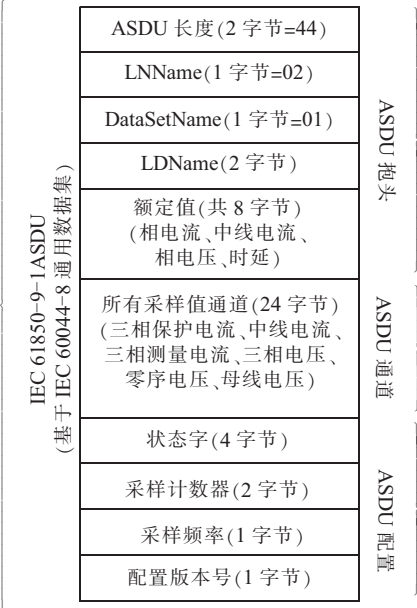


图 2 基于 IEC60044-8 通用数据集的 IEC61850-9-1 协议 ASDU 格式

影响报文中的通道有效性和保护电流编码值等等；采样计数是报文的编号，表示众多 IEC 61850-9-1 报文的 ASDU 通道中电压电流数据的相对序号，通常按顺序递增，同步时被清零。

IEC 61850-9-1 协议的 ASDU 可以采用其他用户自定义的数据集，数据集中的各通道均可以完全由用户自由定义，各不同的数据集是使用 LNNName, DataSetName, LDName 这 3 个字段来区分。当使用自定义数据集时，采样值通信双方需要协商好自定

义数据集中各通道所包含数据的物理意义。

1.2 IEC 61850-9-2 协议

IEC 61850-9-2 协议与 IEC 61850-9-1 协议一样是基于以太网定义的^[2]，以 MAC 地址标识不同的装置，其表示层、会话层、传输层和网络层也为空。其协议格式的总体结构也一致，由以太网报文头和 APDU 两部分组成，如图 1 所示。

IEC 61850-9-2 协议与 IEC 61850-9-1 协议不同的是 APDU 部分的编码。9-1 协议中仅 APDU 是以 ASN.1 规则进行编码，APDU 中的 ASDU 部分（包括 ASDU 数目和 ASDU 列表）未采用 ASN.1 规则编码，而全部以 Octet String 形式作为 APDU 的 ASN.1 编码的 Value；而 9-2 协议中 APDU 及其中包含的 ASDU 均以 ASN.1 规则编码，且 9-2 协议的 ASDU 中包含智能装置模型中采样值控制块的很多信息，如图 3 所示。IEC 61850-9-2 协议中定义的 ASDU 相对 9-1 协议的 ASDU 而言非常复杂，不仅包含的信息量比 9-1 协议大，而且 9-2 协议的 ASDU 中每一个字段都采用 ASN.1 规则编码^[3]。

IEC 61850-9-2 协议 APDU 中存在一些可选的字段，这些字段可以根据实际应用情况在报文中存在或者不存在。字段的存在与否可以通过在解析 9-2 报文时，读取每个字段的 Tag 值来判定。

1.3 IEC 60044-8 FT3 协议

IEC 60044-8 标准中基于 FT3 传输帧格式定义了过程层采样值传输的报文格式^[4]，FT3 传输帧格式如图 4 所示。其格式比较简单，由一个 2 字节起始

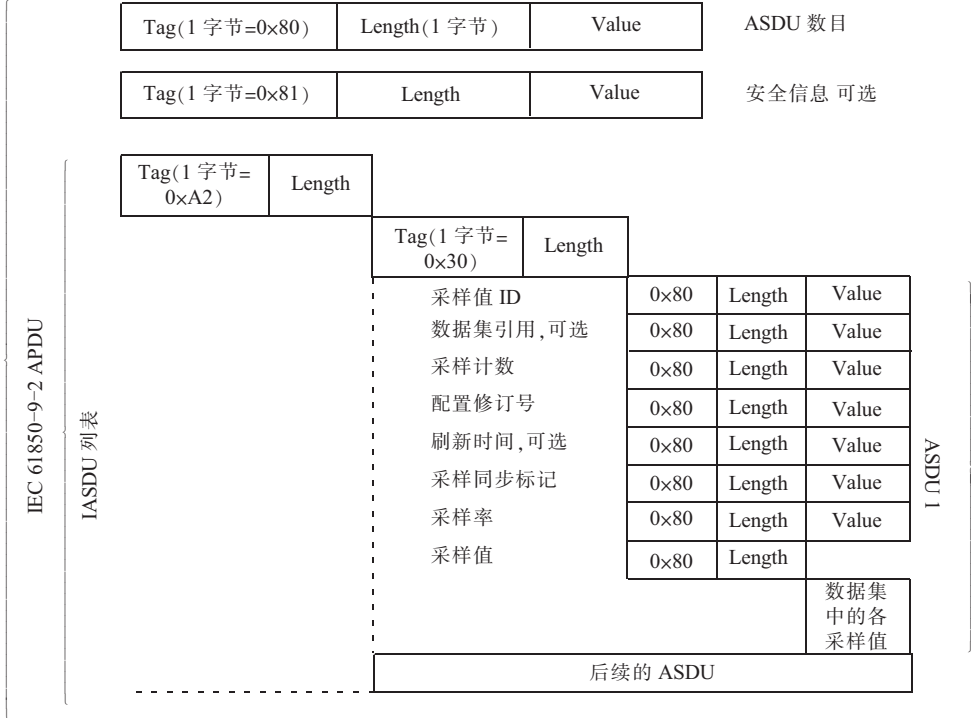


图 3 IEC 61850-9-2 协议的 APDU 格式

符和后续数目不定的有效数据及其校验码组成。

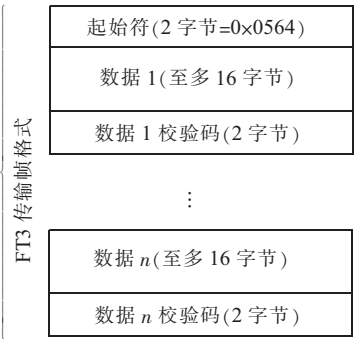


图 4 FT3 传输帧格式

IEC 60044-8 标准中定义的采样值传输协议基于 FT3 传输帧格式定义,其中的通用数据集包含了 3 组有效数据,具体组成参照图 2 所示为:ASDU 报头包含在数据 1 中,共占 14 个字节,后面接 2 个字节的数据 1 校验码;ASDU 通道 1~通道 8,共占 16 字节包含在数据 2 中,后面接 2 个字节的数据 2 校验码;ASDU 通道 9~通道 12 以及 ASDU 配置,共占 16 字节包含在数据 3 中,后面接 2 个字节的数据 3 校验码。

有效数据后面的校验码是根据有效数据块中的部分字节求和计算得出的,可参考 IEC 60044-8 标准中的计算公式。

FT3 传输帧格式仅是一种报文格式定义,至于其中传输的数据,FT3 传输帧格式并没有进行定义。因此,用户可以基于 FT3 传输帧格式定义其中传输的具体通道数目及各通道物理量,从而形成各种采用 FT3 传输帧格式的不同的采样值传输协议。

2 智能变电站过程层协议的分析

(1) 协议格式复杂度。IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议相对 IEC 61850-9-2 协议相比简单许多。前 2 个协议报文中所含字节数相对恒定,报文中包含的信息比 9-2 协议少且编码简单,而 9-2 协议中所有信息均采用 ASN.1 规则编码。通常情况下,在传递相同通道数目的采样值时,IEC 61850-9-2 协议格式的报文比另 2 种报文长。

(2) 灵活性。IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议虽然也能对报文中所含的采样值的数目进行配置,但在标准中只定义了通用数据集,该数据集仅包含 12 个通道的采样值,IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议报文中一般采用该通用数据集。而 IEC 61850-9-2 协议在传输采样值时,其报文中所传输的数据与智能装置模型中定义的数据集相对应,因此其通道数与装置模型中数据集所包含的数据对象个数一致。由此可知,IEC 61850-9-2 协

议比另 2 个协议更加灵活,其传输的采样值来源于装置模型中的数据集,随着数据集定义的不同,IEC 61850-9-2 协议便能传输不同的采样值。而 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议所传输的数据则比较固定,通常传输 IEC 60044-8 标准中所定义的通用数据集。

(3) 实现难度。由于 IEC 61850-9-2 协议中所包含的各字段的起始偏移及长度是不定的,在实现 IEC 61850-9-2 协议时必须要按照字段的顺序,先组装前面的字段,对前面字段的修改都会影响到后面的所有字段的偏移,并且 IEC 61850-9-2 中各字段都要按照 ASN.1 规则编码成 TLV 3 个部分。而 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议由于其各字段的偏移及长度是固定的,其报文中前面字段的组装不会影响到后面字段,对前面字段进行修改时只需修改该字段的值,对后续字段没有任何影响。因此 IEC 61850-9-2 协议的实现,需要考虑更多的问题,比另 2 个协议的实现难度大。

(4) 实时性。由于 IEC 61850-9-2 协议中各字段的偏移和长度的不定性,在组装和解析 IEC 61850-9-2 协议的报文时,需要首先找到所关心字段的起始位置,才能读取到该字段的值。而 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议中各字段的偏移固定,在组装和解析它们的报文时,直接从偏移位置写入和读出该字段的值即可。因此组装和解析 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议比组装和解析 IEC 61850-9-2 协议的效率更高。

(5) 可靠性。IEC 60044-8 协议不是基于以太网的,采用此协议的装置之间通过光纤直连,而 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 61850-9-2 协议则是基于以太网组播的,通常接入交换机多个装置可以同时接收到。可见,IEC 61850-9-1 协议和 IEC 61850-9-2 协议的可靠性往往受到交换机的影响,当交换机上的通信负荷较大时,会出现采样值传输报文丢失等情况,而 IEC 60044-8 由于是与保护和监控装置直连,具有很高的可靠性。

综上所述,IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议的特性类似,而 IEC 61850-9-2 协议则更复杂、更灵活,但较难实现,且实时性不如 IEC 61850-9-1 协议和 IEC 60044-8 协议,在可靠性方面,IEC 60044-8 协议优于其他协议。

3 智能变电站过程层协议的编程实现

3.1 IEC61850-9-1 协议的编程实现

IEC 61850-9-1 协议的组装过程如图 5 所示。IEC 61850-9-1 协议是基于以太网的,其报文前部

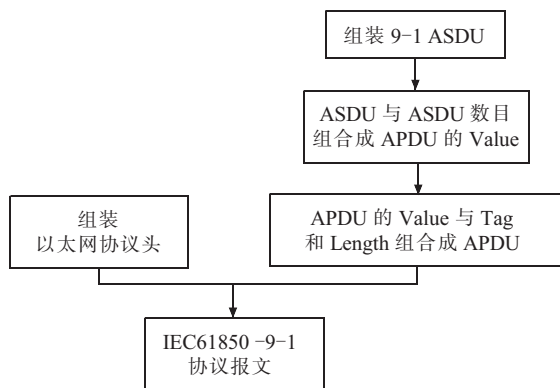


图5 IEC 61850-9-1 协议组装过程

分是以太网协议头,格式如图1所示。以太网协议头的组装比较简单,因其所包含的各字段长度固定,此时只需要定义一个 struct 结构,再定义相关函数用来对该 struct 中各字段进行填写和读取即可。

APDU 的组装与以太网头的组装相比较复杂,APDU 以 ASN.1 规则编码,如图1所示:Tag 为 0x60;Length 为后续 Value 的长度;Value 包含 ASDU 的数目及 ASDU 列表,它们以 Octet String 类型直接编码。组装 APDU 的核心是组装 ASDU,虽然 ASDU 中包含多个字段,但 ASDU 中各字段的长度均固定,因此组装 ASDU 和组装以太网头一样简单,只要定义相应 ASDU 的 struct 即可,然后编写相关函数对该 struct 中各字段进行读写即可。

将组装好的 ASDU、ASDU 数目、APDU 的 Tag 和 Length 拼起来便构成了 APDU。再将组装好的以太网协议头和 APDU 连接起来,便组装出了 IEC 61850-9-1 协议报文。

3.2 IEC 61850-9-2 协议的编程实现

与 IEC 61850-9-1 协议类似,IEC 61850-9-2 协议也是基于以太网的,因此也需要首先组装以太网头,而 IEC 61850-9-2 的 APDU 组装相对比较复杂,因其每个字段都采用 ASN.1 规则编码。IEC 61850-9-2 协议的组装过程如下图6所示。

IEC 61850-9-2 协议组装过程中的难点在于组装 ASDU 主体,其包含多达 8 个字段,每个字段都采用 ASN.1 规则编码。ASDU 主体与 ASDU 数目合成便组成 APDU 的 Value,再与 APDU 的 Tag 和 Length 合并即得到 APDU 的编码,最后与以太网协议头合并记得到 IEC 61850-9-2 协议的报文。

3.3 IEC 60044-8 协议的编程实现

IEC 60044-8 协议的报文通常采用通用数据集,基于 FT3 传输帧格式。该协议中各字段长度固定,因此组装该协议非常简单,只需依照该协议的报文格式定义一个 struct,再定义与之对应的读写 struct 中各成员的函数即可。该变量所占据的内存块

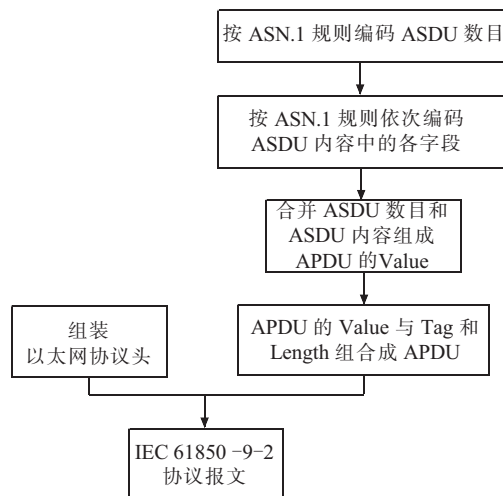


图6 IEC 61850-9-2 协议组装过程

即是 IEC 60044-8 协议的报文。

4 结束语

智能变电站中过程层广泛使用了 3 种采样值传输协议,分别是:IEC 61850-9-1 协议、IEC 61850-9-2 协议和 IEC 60044-8 协议。在复杂度、灵活性、实现难度和实时性 4 个方面对其进行了比较,指出了各自的优缺点,并给出了这 3 种协议编程实现的方法。过程层采样值传输给保护装置提供了数据源,是保护装置完成一切功能的基础,因此采样值的正确快速传输具有非常重要的意义。本文的研究可以对智能变电站建设中如何合理的选择过程层采样值传输协议提供一定的参考。

参考文献:

- [1] DL/T 860.91—2006/IEC61850-9-1,变电站通信网络和系统第 9-1 部分:特定通信服务映射(SCSM)单向多路点对点串行通信链路上的采样值[S].
- [2] DL/T 860.92—2006/IEC61850-9-2,变电站通信网络和系统第 9-2 部分:特定通信服务映射(SCSM)映射到 ISO/IEC 8802-3 的采样值[S].
- [3] GB/T 16263—1996/ISO8825,信息处理系统 开放系统互连抽象语法标记-(ASN.1)基本编码规则规范[S].
- [4] GB/T 20840.8—2007,互感器 第 8 部分:电子式电流互感器[S].

作者介绍:

徐瑞林(1965),男,江苏镇江人,高级工程师,从事智能电网调度控制等方面技术研究和管理工作;

高晋(1981),男,重庆人,工程师,从事智能变电站及智能配网研究工作;

杨洪涛(1981)男,湖北襄阳人,工程师,从事电力系统实时数字仿真、通信规约的研究以及测试工具的开发工作;

钟加勇(1981),男,四川内江人,工程师,从事继电保护及智能变电站技术研究工作;

张友强(1981),男,重庆人,工程师,从事继电保护研究工作。

(下转第 53 页)

城乡电网综合监管系统的设计

王梦玲¹, 邱益农²

(1.南京供电公司,江苏 南京 210008;2.江苏联宏自动化系统工程有限公司,江苏 南京 210046)

摘要:针对我国目前电网运行及用电管理的实际情况,为适应国家坚强智能电网建设战略的信息化、数字化、自动化、互动化的要求,为及时、准确、全面反映各电压等级电网的结构、设备性能情况、用电构成及管理水平,准确查找线损异常因素,减少电量损失,提出并设计了一套城乡电网综合监管系统,形成包括负荷管理、电能量采集、配变监测、低压集抄的一体化系统。详细阐述了该系统的结构和通信原理,介绍了配变终端、采集终端、配变监测系统软件的功能和特点。

关键词:城乡电网;LonWorks;配电变压器;监管系统

中图分类号:TM727

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0050-04

近年来,随着城乡经济的高速增长,原有的配电网和供电模式已经不能充分满足客户电力发展和居民生活用电的需要。为充分满足电力系统供电侧、售电侧、购电侧等多种对象的电能量信息的采集和监控,如变电站关口、公共配电变压器、大客户及中小客户等,城乡电网综合监管系统运用负荷管理系统设计思想和资源,利用现代计算机技术和通信技术,实现对城乡配电网各种用电对象的动态监测功能,通过负荷控制、故障自动诊断、网络拓扑分析和无功自动投切等功能,改善电能质量,提高供电可靠性,减少配电设备维护成本,提高工作效率及降低线损等重要指标计算的准确性,进而提高电力部门的劳动生产率。

1 系统总体结构

城乡电网综合监管系统可由3层物理结构组成,如图1所示。第1层为主站,负责整个系统的电能信息采集、用电管理以及数据管理和数据应用等。第2层为数据采集层,负责对各采集点电能信息的采集和监控,包括各种应用场所的电能信息采集终端。第3层是具体的采集点监控设备,即电能信息采集源和监控对象,如电能表和相关测量设备、客户配电开关、无功补偿装置以及其他现场智能设备等。通信网络完成系统各层之间的数据传输,可以是专用或公共无线、有线通信网络以及电力线载波通信网络。

系统可由监管中心、配变综合监控终端、光纤以太网或者GPRS无线网络、双绞线或电力载波LonWorks^[1]控制网络、多功能电力监控终端、变压器下游侧采集终端、智能表计、配变终端及采集终端、现场抄表器等组成。其中,配变综合监控终端具有变压器监控、无功补偿控制和抄表集中器等多项

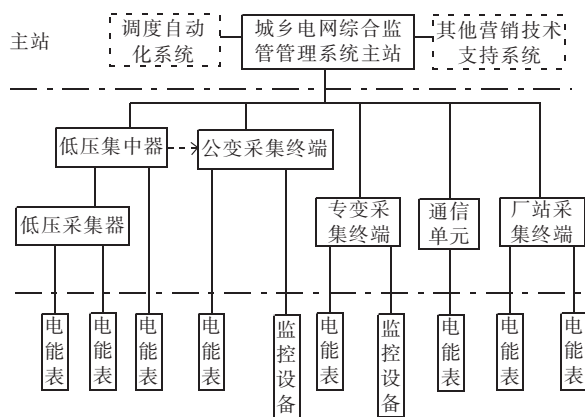


图1 城乡电网综合监管管理系统物理结构

功能。多功能电力监控终端对10 kV供电回路实现遥测、遥信与遥控。变压器下游侧由采集终端、单相或三相LonWorks电力线载波接口电能表及常规RS485接口电能表组成^[2]。现场抄表器的使用,则能方便配变终端和采集终端的现场安装、调试以及故障监测和设备维护。

系统的远程通信网络可采用多种无线、有线数据传输网络,例如GPRS无线网络、CDMA无线网络、宽带、光纤等,实现主站和数据采集层设备间的数据传输。系统的本地通信网络用于数据采集层的采集终端之间以及采集终端与电能表之间的通信,可采用LonWorks电力线载波、RS485总线以及各种其他有线网络。

主站与配变终端间、主站与直接通信的电能表通信单元间的数据传输协议均采用DL/T 698.41。低压集中抄表终端与电能表的数据传输协议采用DL/T 698.42。其他电能信息采集终端与电能表的数据传输协议应支持DL/T 645。

2 系统实现的主要功能

2.1 丰富的数据采集功能

系统通过配变终端采集负荷和电能量实时数据

和历史数据,监视电能表和相关设备的运行状况以及供电电能质量等。可采用定时自动采集、典型日数据采集、随机召测数据、主动上报数据等方式。

电能数据有:当前和冻结电能示值、最大需量等;交直流模拟量有:电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、谐波等;状态量有:开关状态、终端及计量设备工况信息;电能质量数据统计有:电压、功率因数、谐波、频率等越限统计数据;事件记录数据有:终端和表计记录的事件记录数据。

2.2 多种数据管理功能

2.2.1 数据合理性管理方面

可提供采集数据完整性、正确性的检查和分析手段,发现异常数据或数据不完整自动进行补采。提供数据修正手段对错误数据、不可补采的数据进行统计分析处理和事件记录,保证原始数据的唯一性和真实性。主站发现异常数据可按设置要求告警和提示。

2.2.2 数据的分析和计算方面

根据应用功能需求,用户可通过配置或公式编写,对采集的原始数据进行加工和处理,包括:按区域、行业、线路、自定义群组、单客户等类别,按日、月、季、年或自定义时间段,进行负荷、电能量的分类统计分析;电能质量统计分析,对监测点的电压、电流、功率因数、谐波等电能质量数据进行越限、合格率等统计分析;计算线损、母线不平衡、变损等。

2.2.3 一体化数据存储管理方面

采用统一的数据存储管理技术,对采集的各类原始数据和应用数据进行分类存储和管理,为数据应用提供一体化数据平台。对外提供统一的数据服务接口,为其他系统开放有权限的数据共享服务。

2.2.4 数据的综合查询和应用

系统支持数据综合查询功能,并提供组合条件方式查询相应的数据页面信息。

按应用需求,支持有序用电管理、异常用电分析、电能质量数据统计、报表管理、线损分析、增值服务等应用功能。实现了用电异常监测、重点客户监测、事件处理和查询。还可以进行电压越限统计、功率因数越限统计、谐波数据统计、线损和母线不平衡及变损分析。此外,还能 WEB 信息发布及综合数据查询等。提供了网络化的接口,数据随时发布,提升电力监督管理能力。

2.3 系统总体技术和性能指标

可靠性指标:低压集抄终端的 $MTBF \geq 7.6 \times 10^4$ h;其他终端的 $MTBF \geq 2 \times 10^4$ h。系统可用性指标:主站和终端的年可用率应 $\geq 99.5\%$ 。

系统的响应速度指标:遥控操作响应时间 < 5 s;

重要信息(如重要状态信息及总功率和电能)巡检时间 < 15 min;常规数据召测和设置响应时间(主站发送召测命令到主站显示数据的时间) < 15 s;历史数据召测响应时间 < 30 s;客户事件响应时间 < 30 min。数据库常规数据查询响应时间 < 10 s;数据库模糊查询响应时间 < 15 s。

3 配变终端实现的主要功能

配变终端由开关电源单元、信号采集单元、数字信号处理单元、系统管理单元以及输入输出以及通信接口单元等部分组成。采用 AT9200 为核心处理器进行采集数据的处理、存储、显示和通信,并对报警节点进行实时监测;为保证采样精度,选择 ADI 公司出产的 16 位 6 通道同步 ADC 芯片 AD73360,选择 ADI 的 BF531 作为采样处理芯片;为保证系统时钟的精确、稳定,选择 8025t 时钟芯片。此外,为断电状态保存数据和设备报警通信,选用 12 V 的可充电锂电池作为后备电源。配变终端原理如图 2 所示。

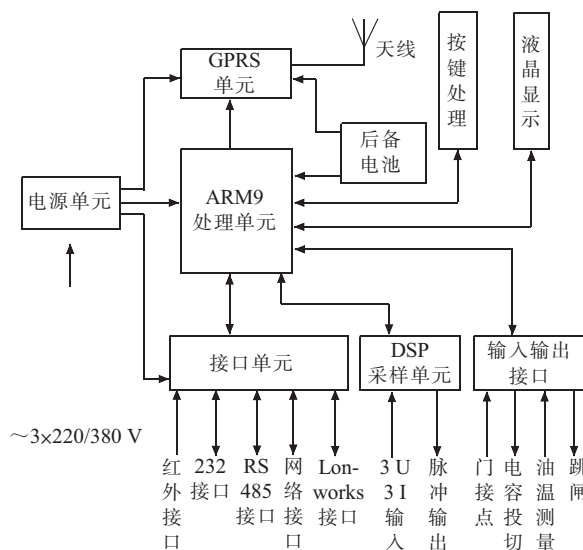


图2 配变终端原理

3.1 在测量方面的功能

为保证数据采集的密度和精度,选用 ADI 的 BF531 数字信号处理器进行电压、电流的采样,可在 400 MHz 主频下工作,配有 NOR FLASH、SDRM,配置外部看门狗和掉电监控,能在停电时及时保存必要的数,保存在 FLASH 中。

测量功能主要包括:相电压、线电压;相电流和零序电流;三相分相的有功功率、无功功率及总有功、无功功率;三相功率因数和总功率因数;状态量当前状态的变位去抖和采集;能够计算 0~19 次谐波以及波形畸变系数(THD)^[3];温度传感器接入的温度测量;0~5 V 或 4~20 mA 输入量测量。

3.2 在计量方面的功能

主控制板以 Atmel 的 ARM9 单片机 AT9200 为核心,CPU、NAND FLASH、NOR FLASH、SDRM 设计在一块核心板上,用两排 80 芯的接插件与底板连接。并且尽量将所有资源引出。

计量功能主要包括:计量多时段总的及分相的正向有功电能、正反向无功电能,并存储其数据。要求至少存储最近 12 个月或最近 12 个抄表周期的数据,数据转存分界时间为每月月末 24 时(月初零时)或其他抄表日的任意时刻;可以定义其他抄表日及时刻;转存的同时,当月最大需量值应自动复零,对非指定的抄表日,抄表时数据不转存,最大需量也不复零。抄表日及时刻设定可就地设置,允许远方设置时,应当有相应权限的密码保护。还能够在指定的时间区间内,测量最大需量、分时段最大需量及其出现的日期和时间。需量周期可在 5,10,15,30,60 min 中选择,滑差(窗)式^[4]需量周期的滑差时间可在 1,2,3,4,5 min 中选择,需量周期应为滑差(窗)时间的整数倍 5 倍以上。需量周期选择和滑差时间就地和远方均可设置。能接受远方冻结命令进行数据冻结或根据预设周期进行数据冻结。已经具备二路 LED 显示脉冲及四路光耦电度脉冲输出,脉冲输出时间间隔必须保证在输入 1%额定电流。 $\cos\varphi=1$ 时每个脉冲间隔 <1.5 min。最大需量值应能在就地和远方清零。

3.3 报警功能

按照设定的阈值、允许持续时间、告警功能等,实时计算出配变电压、负荷电流的三相不平衡率、过负荷、零序电流等,超限时产生报警记录。

3.4 无功补偿功能

具备 RS485 通信接口和无功补偿装置通信。

3.5 数据安全防护功能

(1) 功率设置、电量清零、需量清零、误差调整(除广播校时外)按参数分类有硬件的写保护措施。

(2) 参数的修改可产生操作记录,该记录无法删除,可以远方召唤。

(3) 失去工作电源时,终端能保持断电前数据及保证实时时钟计时正常,数据可无电保存 3 年以上,实时时钟能持续计时 3 个月以上。

(4) 终端停电来电时间和终端复位次数等操作记录。

(5) 软件升级设置密码保护,密码位数不少于 6 位,可区分本地版本升级和远程版本升级各自允许的内容和等级;版本升级的操作产生操作记录。

(6) 能够记录停电时间和停电次数,产生操作记录。

(7) 记录终端内部异常事件(如自检错、硬件错

等)发生的事件及当前电量。

(8) 终端具备各被测量误差调整功能,其误差允许范围正负 5 s。为防止曲线记录的非连续,在时差不超过曲线记录 2 个时间间隔点的情况下,应采用渐进式校时,超过则重新开始新的曲线记录,同时产生告警和操作记录。

(9) 操作记录不可删除。

(10) 告警、操作、事件等记录记忆容量每个类型不少于 64 条,记录个数超过容量时,覆盖时标最早的记录。

(11) 终端记忆的任何数据都自带数据完整性校验功能,具有有效/无效校验和指示功能。

3.6 遥控和遥信功能

能够实现一路以上的超功率跳闸控制,可根据配变协议进行远程遥控和终端设备本地闭环控制;同时,可对遥控动作后的动作节点进行遥信,查询其状态。

3.7 电表数据集中器功能

为提高系统运行效率,充分利用配变终端的功能,提高系统抄收电表数据的速度,可在配变终端上附加电表数据集中器功能,自动抄收所属采集器内保存的电表运行信息并保存在该设备中。集中器或所属采集终端及电表故障主动报警上传。

4 采集终端实现的功能

电表采集终端采用通用的 FT5000 单片机作为主 CPU,具有成本低且硬件结构简单的特点。接有一片铁电 FM24CL64 作为在线可电擦除存储器,保存采集到的各电表数据。还包括复位电路、时钟电路、外部 RAM 扩展、485 通信电路、电源电路等。

FT5000 串口可与 RS232 或 RS485 进行有线通信;通过硬件跳选选择,FT5000 串口可与 Mbus 进行通信;FT5000 具有 LonWorks 网络通信接口,可方便接入网络。

4.1 对时功能

在综合考虑可实现性和经济性的基础之上,采用广播对时的形式。在采集终端还对下属的电表表进行对时。如发现电表有故障,则及时上报。采集终端内有状态字,状态字的定义符合《自动抄表系统通信规约》^[5]要求。

4.2 通信功能

上行采用 LonWorks、RS485 及红外通信;下行通信采用 RS485,还有在线编程接口。

4.3 数据传送功能

能实时采集所接表位的设备实时参数和日、月参数;能按自动抄表周期采集并保存采集的数据;每

个采集终端整点过 10 min 自动抄收其归属内电表数据。并能保存其前 2 个月的数据。当下一次抄表时自动刷新。采集终端最多可下挂 32 个电能表。实时参数从电表采集后主动直接上传,也可以通过终端上接集中器或掌机被动式上传数据。

5 结束语

城乡电网综合监管系统的应用,适应国家坚强智能电网建设战略的信息化、数字化、自动化、互动化的要求,有效地解决了电力部门在配变管理方面缺乏有效监测、分析手段的问题。在生产管理方面:利用系统提供的数据支持,可以解决电压合格率、功率因素等方面的问题,满足生产指标管理的需要。在经营管理方面:对配网变压器的实时监控,使计量回路 PT 断线、表计故障等造成电量少计、漏计的问题能得以及时发现,通过实时线损分析,最大程度减少供电损耗,为防窃电工作提供技术支持,提高了供电企业的直接经济效益。城乡电网综合监管系统的建立,在实现自动监视变压器的运行状况的同时,还能通过多种技术措施及时、可靠地采集线路上电能表

的运行参数和电量数据,提高电力设备的利用率及工作效率,为更加全面、科学地进行线损统计、负荷分析预测、电压合格率统计、城区配变网规划、优化供电方案、城网建设与改造项目决策等提供科学的依据。

参考文献:

- [1] 岳 姝.Lonworks 现场总线简介[J].电工技术,2000(8):13-15.
- [2] 吴苗凤.现场总线技术在 ± 500 kV 枫泾换流站的应用[J].上海电力,2011(2):30-34.
- [3] 王现军,姬 波.电力系统谐波功率分量的快速估算[J].现代电子技术,2003,26(11):27-31.
- [4] 潘文诚.基于 DDS 技术的工频频率滑差源[J].电力自动化设备,2005,25(1):37-39.
- [5] 邢建平,刘晓娟,吕玉军.自动抄表系统设计[J].铁路计算机应用,2011(4):29-30.

作者简介:

王梦玲(1973),女,陕西大荔人,工程师,从事电力电表的研究、设计和鉴定工作;
邱益农(1969),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事自动化仪器仪表的研究、设计和鉴定工作。

Design of Comprehensive Supervision System in Urban and Rural Power Grid

WANG Meng-ling¹, QIU Yi-nong²

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;

2. Jiangsu Lianhong Automation Co.Ltd., Nanjing 210046, China)

Abstract: For the actual situation of power operation and management, and in order to adapt to the informatization, digitization, automation and mutualism requirements of strong smart grid construction strategy, a set of comprehensive supervision system of urban and rural power grid is proposed. The system can comprehensively reflect the structure of voltage level of power grid, equipment performance, power structure and management level accurately. And the abnormal factors of power loss can be found correctly, thus the power loss can be reduced. The comprehensive supervision system includes load management, electric energy acquisition, distribution transformer detection and low-tension concentrate meter reading. Besides, the structure and communication principle of the system are described. In addition, the functions and features of acquisition terminal, distribution transformer terminal and its detection system are also introduced.

Key words: urban and rural power grid; LonWorks; distribution transformer; supervisory system

(上接第 49 页)

Analysis and Program Realization of Sampled Value Transmission Protocols in Intelligent Substation

XU Rui-lin¹, GAO Jin¹, YANG Hong-tao², ZHONG Jia-yong¹, ZHANG You-qiang¹

(1. Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Intelligent substation is the trend of the development of substation. The transfer protocol of sampled value in process level of intelligent substation transfers the power system operation data acquired from non-conventional instrument transformers to the protection device and monitoring device. And the normal data transformation is basic for protection device and monitoring device to realize their respective functions. In the paper, three transfer protocols are introduced in detail. And the advantages and disadvantages of the three are compared from the aspects such as flexibility, real-time performance and reliability. Furthermore, the programming methods of the three protocols are also presented.

Key words: intelligent substation; process level; sampled value; transfer protocol; IEC 61850; IEC 60044-8

电力企业 MPLS VPN 信息网络层次化架构的研究

汤 雷
(南京供电公司,江苏 南京 210008)

摘 要:目前电力企业 MPLS VPN 信息网络多为平面化架构,而 MPLS VPN 层次化架构的优势更适应电力企业信息网络发展的需要。介绍了 MPLS VPN 信息网络的基本结构和技术特点,针对南京供电公司平面 MPLS VPN 网络现状,提出了将其优化为核心层、汇聚层和接入层的层次化架构方案。

关键词:MPLS VPN;层次化架构;骨干网边缘路由器

中图分类号:TP393

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0054-03

信息化是电力企业“十二·五”发展的重点,信息网络作为信息系统运行的支撑和平台,其覆盖范围和容量需满足急速增长的电网信息节点和信息数据量的需求,要求作为第二张坚强电网建设并运行,因此信息网络良好的伸缩性和扩容性是目前电力企业信息化发展的必然要求。目前南京供电公司信息网采用三层 MPLS VPN 技术架构建设,使用基于 MPLS VPN 标记交换的特性,缩短路由收敛时限,提升数据转发能力,实现信息系统在全公司范围内的高速互联互通,但 MPLS VPN 网络采用平面化结构,网络的扩展性受到影响,如何适应电网的快速发展和扩大需求,是一个亟待解决的问题。

1 MPLS VPN 网络

1.1 MPLS VPN 网络平面化架构

MPLS VPN 是第三代网络架构,是新一代的 IP 高速骨干网络交换标准,是一种基于 MPLS 标记交换技术的 IP-VPN,目前大多数企业内部建设的 MPLS VPN 信息网络多采用平面化架构,其包括骨干网路由器(P)、骨干网边缘路由器(PE)、用户边缘路由器(CE)3 种类型设备。

(1) P。骨干网中不与 CE 直接相连的设备,只负责转发,不感知 VPN;(2) PE。骨干网中的边缘设备,它直接与用户的 CE 相连,完成 VPN 实现的主要功能;(3) CE。用户站点中直接与骨干网相连的边缘设备,不感知 VPN,只支持标准的 IP 路由转发功能。

平面化架构的 MPLS VPN 网络的 VPN 接入和路由功能都集中在 PE 设备上,P 和 CE 设备均不感知 VPN,只负责数据转发^[1]。

1.2 MPLS VPN 网络层次化架构

在 MPLS VPN 网络平面化架构的基础上,发展了一种层次化架构,该架构将原平面化架构内的设

备角色细分化和多样化。在层次化架构中,将传统的 PE 设备分为用户端 PE(UPE)和服务端 PE(SPE),UPE 为直接连接 VPN 用户的路由器,SPE 为连接 UPE 设备的路由器^[2]。UPE 具有传统 PE 的基本功能,但性能要求低得多,SPE 对性能要求很高。层次化结构中将取消 CE,UPE 综合了很多 CE 功能,SPE 可以连接 UPE 也可以连接 CE。UPE 和 SPE 组成了一个分层 PE 结构,同时一个分层 PE 结构中的 SPE 也可作为另一个分层 PE 结构中的 UPE,形成一个嵌套层次结构,这个嵌套层次结构中间的 PE 称为中间层 PE(MPE),如图 1 所示。

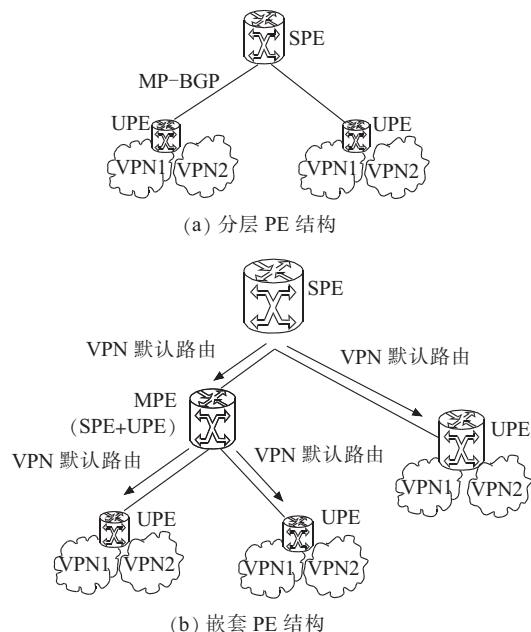


图 1 分层 PE 结构和嵌套 PE 结构

在层次化的 MPLS VPN 结构中,SPE 和 MPE 以及 MPE 和 UPE 之间,均运行 MP-BGP 协议。在运行 MP-IBGP 协议时,SPE 是各个 MPE 的路由反射器,MPE 则是各个 UPE 的路由反射器。BGP 协议为上层 PE 发布下层 PE 上的所有 VPN 路由,而只下层 PE 发布上层 PE 的 VPN 默认路由或聚合路

由。因此,SPE 上维护了这个分层 PE 结构所接入的所有节点的 VPN 路由,路由数目最多;MPE 上维护了一部分路由,数目较多;UPE 上只维护其所直接连接的节点的 VPN 路由,数目最少。因此在这个层次化 MPLS VPN 结构中,SPE 设备要求最高、MPE 其次,UPE 可以选用性能较低的路由设备,这正与信息网的分层结构模型相匹配,解决了原平面模型中网络扩展能力差的弱点。

1.3 层次化结构下的信息节点接入

MPLS VPN 平面化网络架构对远端信息节点通过广域网链路接入要求较高,当 VPN 用户距离 PE 较远时,所需要的 WAN 链路数目至少同 VPN 用户的数目相同,这会极大增加网络建设成本。在层次化架构下,远端众多的 VPN 用户只需通过多条 LAN 链路接入到 UPE 上,再通过 UPE 上联的一条广域网链路上行(如图 2 所示),节省了通信系统资源,尤其在通信资源较紧张的区域非常适合,能区分接入各个节点不同的 VPN 数据流,提高了安全性。

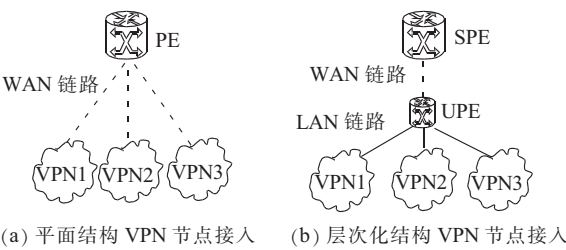


图 2 平面结构和层次化结构信息节点接入的对比

2 南京供电公司 MPLS VPN 信息网层次化架构研究

2.1 MPLS VPN 网络现状

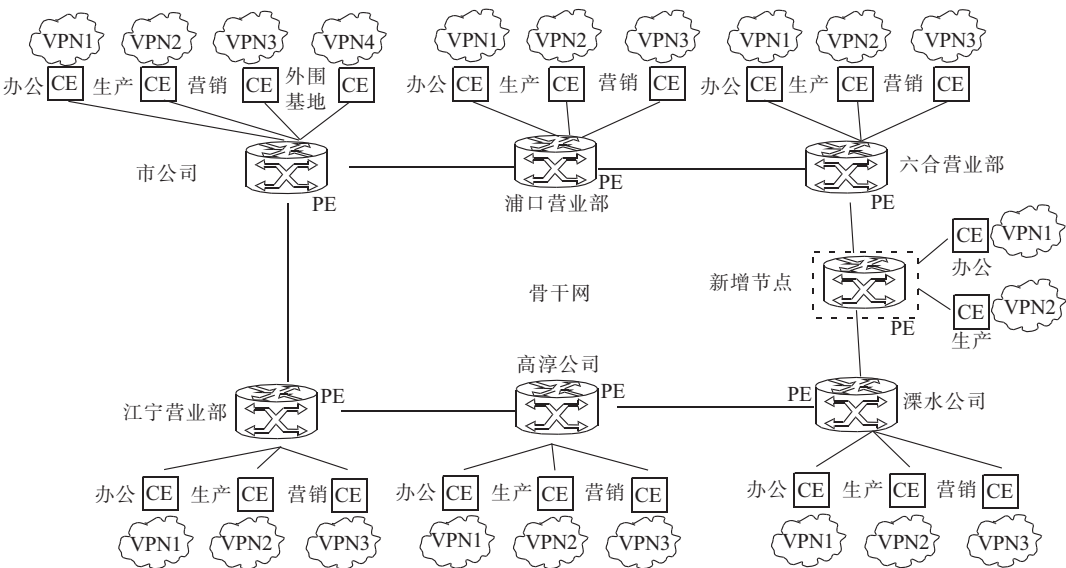


图 3 南京供电公司信息网 MPLS VPN 架构

南京供电公司信息网为 MPLS VPN 平面化架构(如图 3 所示),采用 BGP 路由协议。

在目前的平面化网络架构模式下,如果其中某些性能较低的 PE 存在性能和扩展性的问题,制约了公司整个信息网络 VPN 业务的广泛覆盖能力与进一步的扩展能力。公司信息网络建设为适应电网发展的需要,正在向运营商网络架构靠拢,由平面化向层次化过渡,需考虑以下问题。(1) 在哪一层部署 PE 节点。PE 节点接入用户需要大量接口,处理用户报文需要大容量的内存和转发能力,而各层 PE 难以同时具备高性能和大量接口。(2) 接入层部署 PE 节点。在接入层部署 PE 节点,使用高性能大容量多接口的 PE 路由器,可以增强网络的扩展性,但网络建设成本过高,从企业管理运作成本的角度考虑,这种方法不妥。

如图 3 所示,在公司平面 MPLS VPN 网络中,需要新增接入 1 个小型信息节点,为了满足平面网络中数据转发和网络收敛的要求,使此信息节点不成为平面网络中的瓶颈,必须在此节点中配置与平面网络中其余节点中级别相同的 PE,而按常规部署此节点只需配置 1 个低端 PE 即可满足网络接入需要,但因平面化网络的结构问题使其必须配置过高规模的 PE,增大了网络建设投资,造成资源浪费。

通过以上分析,可以推断出 MPLS VPN 平面化模型与信息网层次化结构发展存在矛盾,在一个层次化网络中如何部署 PE 节点,存在着诸多难题。因此,为适应信息网络层次化发展,需要对公司 MPLS VPN 网络进行层次化构造,结合层次网络的特点,满足公司信息网发展需求。

2.2 MPLS VPN 信息网层次架构优化

根据南京供电公司信息网的特点和今后发展的

需求,对使用层次化架构对南京供电公司 MPLS VPN 网络优化进行了研究。将公司信息网原平面架构进行三层架构优化,分为核心层,汇聚层和接入层。具体如下:(1) 市公司作为核心层,部署 1 台路由和转发能力最强的 SPE 设备;(2) 江宁、浦口、六合营业部和溧水、高淳公司作为汇聚层节点,部署性能中等的中间层 MPE 设备,既作为核心层下层的 UPE 又作为接入层上层的 SPE,汇聚层也可以部署只具备基本性能的单独 UPE 设备,提高数据网在汇聚层的扩展能力;(3) 在汇聚层各个节点内和信息网远端节点部署只需具备基本性能的 UPE 设备(如 Cisco 2800、Huawei AR28 系列),实现各节点 VPN 用户的接入,形成接入层,接入层可以通过增加部署性能要求较低的 UPE 设备来方便实现新建 VPN 节点用户的接入,极大提高了信息网在接入层的扩展能力以及整个信息网在网络边缘的扩展性。

在 MPLS VPN 网络经过层次化架构优化后,较原来的平面化架构,网络的扩展能力更加灵活,在

汇聚、接入层面都可进行灵活的扩展和优化,实现了一个更具有弹性发展空间的公司信息网。如图 4 所示,在层次架构下的 MPLS VPN 网络中,如需新增接入 1 个小型信息节点,可将此节点纳入层次网络中的汇聚层,并在此节点内配置 1 个低端的 UPE,与核心层的 SPE 相连,即实现该节点的网络接入,相比平面架构网络,该信息节点网络设备投资大大节省,并且实现了资源利用最大化。因此在 MPLS VPN 层次网络中,设备部署方式灵活,节省了信息设备和通信资源投资,降低了网络扩展建设成本。

3 结束语

MPLS VPN 信息网的层次化是今后电力企业信息网络发展的趋势,层次化后的 MPLS VPN 网络架构更适应电网快速增长的信息节点和数据量的需要,灵活且具有弹性的层次化网络架构具有更强的扩展性和投资效益性,能更有效适应信息系统业务日趋复杂,网络覆盖范围更广的趋势。

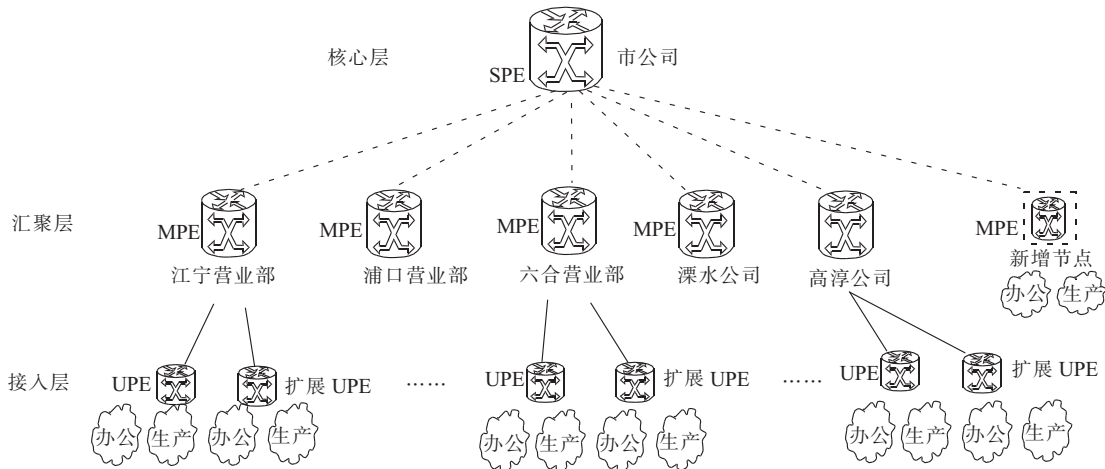


图 4 南京供电公司 MPLS VPN 网络层次化架构

参考文献:

[1] PEPELNJAK I, GUICHARD J. MPLS 和 VPN 体系结构 [M]. 田果, 刘丹宁, 沈铮, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
[2] GUICHARD J, PEPELNJAK I, APCAR J. MPLS 和 VPN 体系结构 [M]. 第 2 卷. 卢泽新, 朱培栋, 齐宁, 译. 北京: 人民

邮电出版社, 2010.

作者简介:

汤 雷 (1978), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事信息网络管理及维护专业工作。

Research on the Hierarchical Framework of MPLS VPN Information Network of Electric Power Enterprise

TANG Lei

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: At present, most MPLS VPN information network of power enterprise is superficial framework, while the hierarchical framework is more suitable to the development of power enterprise information network. The basic structure and technology characteristics of MPLS VPN information network are introduced in the paper. For the current situation of MPLS VPN network of Nanjing Power Supply Company, the framework is optimized to hierarchical framework including kernel layer, convergence layer and access layer.

Key words: MPLS VPN; hierarchical framework; backbone edge router

基于碳纤维导线压接特性与金具选型的研究

姜广东¹, 严行建², 宋 丹², 仝 娜³, 严晓威⁴

(1.南京电力金具设计研究院,江苏 南京 210037;

2.江苏省宏源电力建设监理有限公司,江苏 南京 210024;

3.江苏易鼎电力科技有限公司,江苏 宿迁 223800;4.远东复合技术有限公司,江苏 宜兴 214257)

摘 要:从复合芯导线生产工艺、结构、玻璃纤维、碳纤维及树脂固化剂的共性和各自物理性、力学性能,结合输电线路运行特征,进行综合性调研、分析和试验,认为碳纤维复合芯导线在输电工程中不宜采用压缩型电力金具,以防将来产生导线断裂事故。碳纤维复合芯导线只能应用楔型电力金具,才能保证碳纤维复合芯导线的运行安全。

关键词:碳纤维;复合芯;导线;压缩型;电力金具;分析研究

中图分类号: TM247

文献标志码: B

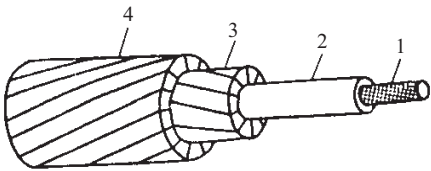
文章编号: 1009-0665(2012)03-0057-03

近年来,碳纤维复合芯导线在国内外输电工程中广泛使用,国内近 200 多个改造增容工程采用该导线,可降低成本,降低线损,提高输电容量,节省通道资源,有助于构造安全、环保、高效节能型输电网络,具有较好的社会效益和经济效益,其配套电力金具同样具有良好的前景^[1]。碳纤维复合芯导线由于其结构的特殊性,常用的耐张线夹和接续管不宜使用,而是采用一种利用楔型自锁原理的耐张线夹和接续管,其结构是将常规压接钢管改为楔型自锁式新型耐张线夹和接续管^[2]。目前国内生产和正在研制上述 2 种金具的有不少厂家,其中江苏宇飞电力科技有限公司对金具进行了独特的改进,有效缩短了金具尺寸,形成自有专利,并通过中电联的鉴定,已在多条线路工程中成功应用^[3]。

1 碳纤维复合芯导线结构及生产工艺

1.1 碳纤维复合芯导线结构

碳纤维复合芯导线结构如图 1 所示,其芯线是由碳纤维为中心层,高模量高强度 S 型玻璃纤维外包浸渍高温模量树脂固化制成的单根芯棒或多根绞合复合芯棒,铝线股为 T 型截面^[4]。



1 为碳纤维增强环氧树脂的内芯;2 为玻璃纤维增强环氧树脂外芯; 3 为第一层梯形铝导线;4 为第二层梯形铝导线

图 1 碳纤维复合芯导线

1.2 碳纤维复合芯生产工艺

1.2.1 主要原材料

碳纤维复合芯是由碳纤维和玻璃纤维或其他

纤维通过拉挤成型的方式制成的单根芯棒,碳纤维通过耐热处理、碳化而成;高强度、高韧性配方的环氧树脂具有很强耐冲击性、耐抗拉应力和弯曲应力。将碳纤维与玻璃纤维进行预拉伸后,用环氧树脂浸渍,然后在模具中高温固化成型为复合材料芯线^[5]。其主要原材料如表 1 所示。

表 1 主要原材料

原料名称	规格及性能
碳纤维	PANEX®35, 50 K, 拉伸强度≥4.1 GPa
高强玻璃纤维	12 K, 拉伸强度≥4.6 GPa
环氧树脂	多官能团环氧树脂, 酚醛类环氧树脂

1.2.2 复合芯生产工艺流程及存在缺陷

复合芯采用拉挤工艺如图 2 所示,将树脂、固化剂、促进剂、填料等按一定比例混合,用搅拌机搅拌均匀后,注入树脂浸槽,纤维浸渍树脂后进入模具连续固化成型。一般来说,碳纤维占 35%,玻璃纤维占 35%,增韧环氧树脂占 30%。将碳纤维整经,单向(0°)集束,在线浸渍韧性环氧树脂溶液,然后包覆玻璃纤维,通过钢制模口,控制其直径,然后在 260℃固化成型,整个工艺为连续制造。这种拉挤工艺使纤维产生拉伸微型裂纹,树脂固化过程因搅拌时灰尘、水气等杂物的侵入,固化层内易产生夹杂、气泡和孔洞等宏观缺陷。一旦受力超过极限应力,如压缩应力等作用,这些缺陷因复合材料徐变特性,缺陷随时扩大而至破断,故压缩型电力金具不能应用于碳纤维复合芯导线。

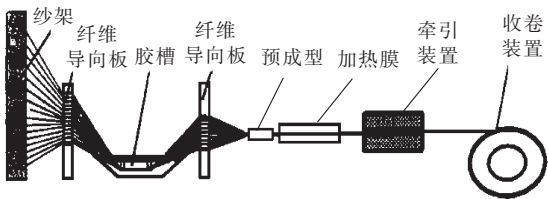


图 2 拉挤工艺示意图

2 复合芯的压缩性能

应用压缩性能的力学原理分析,当复合芯受压时,纤维片和树脂片都将受到压力,纤维片可能出现失稳现象,受着树脂的横向支撑,相当于在弹性基础上的杆件失稳问题。失稳的基本形式有2种,一是相邻两纤维片反向屈曲,此时树脂承受横向拉压应力,称为拉伸型失稳;二是相邻两纤维片同向屈曲,此时树脂受着剪应力,称为剪切型失稳^[6]。

由于压缩的不确定性,再采用较大压缩外力,构件受力更为复杂,其后果难以预测,故不宜采用压缩型电力金具。

3 碳纤维、玻璃纤维和环氧树脂共性及性能

3.1 强度和弹性性能的可设计性

碳纤维复合芯是由树脂、玻璃纤维和碳纤维组成,玻璃纤维和碳纤维的强度或弹性模量比树脂的强度或弹性模量高几十倍,而玻璃纤维和碳纤维在宏观范围内是单向强度的材料,所以玻璃钢和碳纤维的强度或弹性模量在相当程度上取决于所含的玻璃纤维量和碳纤维分布的方向,可在一定程度上设计出各种强度和弹性性能的产品。一般来说,可以设计成3种类型:一是准各向同性材料,二是2个垂直方向上有较高强度或弹性模量的正交各向异性材料,三是在一个方向上有特高强度的单向性材料。单向性材料主要可用作拉力构件如电线芯等,但其共性是受剪应力较低,故受到压缩突变剪应力时,构件随时会损坏。

3.2 主要缺陷

碳纤维复合芯具有复合材料共同优势之外,和所有复合材料一样也存在一些严重影响使用性能的缺陷。

(1) 复合芯的应力应变是线性的,破坏的概率单调递增^[6]。复合芯的缺陷是有一定的脆性,Griffith破坏理论认为:它的应力应变曲线直到破坏是线性的。股纱的应力应变曲线,则由于单纤维受力的不一致以及单纤维强度的不一致,呈现了一个逐步断裂的过程,直到残留的纤维不能承担最大的荷载时全部破坏。而这种破坏的概率,Weiball认为:随着应力的增加,破坏的概率是单调递增的,其概率集度函数为:

$$\varphi(\sigma) = \alpha\beta\sigma^{\beta-1}e^{-\sigma^\beta} \quad (1)$$

式中: $\sigma \geq 0$, $\beta > 0$, 为形状函数; $\alpha > 0$, 为特性函数。在强度 $< \sigma$ 时破坏概率为:

$$P = \int_0^\sigma \varphi(\sigma) d\sigma = 1 - e^{-\sigma^\beta} \quad (2)$$

两位专家共同认为,这是由于材料中自身存在着微裂缝或缺陷而产生高度集中应力使材料的宏观强度不断降低,最终导致材料破坏^[6]。

强度试验也证明,复合芯的破坏常常先是树脂开裂,然后再是纤维的断裂。压缩型电力金具在压缩时产生的集中应力,使复合芯产生微裂,该产品设计是不合理的。

(2) 复杂的疲劳损坏,破坏过程较长。疲劳破坏可以认为是材料内的裂缝形成和扩展的过程。对复合芯这类复合材料来说,问题更为复杂,一般说来,破坏首先开始于树脂和纤维界面的个别点上,这时在材料内已形成了微裂缝,这些微裂缝的进一步扩展,将使部分纤维断裂,裂纹扩展到相邻的纤维和树脂的界面上,或者出现较大区域的分层脱胶,这时试件的承载能力下降,阻尼增高,振幅减小,频率降低,最后导致大量纤维断裂或大区域的分层而破坏。整个疲劳损坏的过程是较长的,裂缝发展速度较慢。这就是压缩型电力金具在压缩后产生微裂而试验时力学性能合格原因所在。

(3) 复合材料的徐变性能。当材料受到一恒定载荷的作用时,除了初始的瞬时变形外,随着时间的增长,变形也随着增加,这种现象称为徐变^[6]。影响徐变性能的因素较多,主要有受力形式(拉、压、弯扭)、载荷方向、应力大小和温度等^[6]。复合材料的徐变有如下规律。

① 当主应力方向平行于径向或纬向纤维时,无论是拉伸还是弯曲徐变,其徐变量都较小,初始应变与徐变试验结束时的最终应变的比值都在0.7以上(复合材料)。

② 当主应力方向与经纬向成一定角度时,随着角度的增加而增大,当成 45° 时,徐变较激烈,拉伸徐变总应变约为初始应变的3倍。徐变不仅与时间有关,而且与应力的大小有关,在30%静强度的应力作用下,徐变总挠度约为初始挠度的5倍半。

③ 当应力大于静强度的50%时,试件相继发生徐变破坏,随着应力的增大,徐变时间相应缩短,即材料的持久强度随着时间的增长而降低。对同一种复合材料来说,尽管所受的应力不一样,但徐变破坏时的总应变值基本相同,随时间延长而变大。

当压缩型电力金具应用于碳纤维复合芯导线,复合芯徐变特征完全相同。故压缩型电力金具在复合芯导线试验时,虽然复合芯受到破坏,产生微裂纹,但力学性能仍为合格。当第一模压完后,发生单向突变(如图3所示),应力也产生了一定的角度。随着时间推移,很难不出现断裂安全事故。故压缩型电力金具不能应用于碳纤维复合芯导线。

4 碳纤维复合芯压缩后微观变化

根据文献,钢压接管压接后,伸长率为 12%~15%,内径缩小 10%~15%^[7],大于碳纤维复合芯 3.5%综合延伸率,故碳纤维复合芯的玻璃纤维、碳纤维和树脂压缩后将产生各种数量不同和形状各异的微裂。

4.1 复合芯中纤维微裂机理

通常采用透射电镜(TEM)和扫描电镜(SEM)研究碳纤维复合芯中碳纤维的微裂机理、缺陷类型和强度分散性。

复合芯中碳纤维在压缩后,单根碳纤维产生突变拉伸点或细颈点,急剧变形,微裂剧增,如图 3 所示,这种急剧变形严重影响复合芯力学特性。

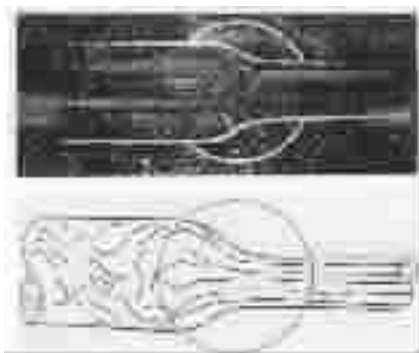


图 3 压缩后单向突变

其最典型的是拉伸断裂,拉伸断裂与错排晶体有关^[8]。错排晶体是指晶体取向不是平行纤维轴,而是偏离纤维轴。一是受到剪切应力难以释放出来,形成了垂直于纤维轴方向的应力集中点,其方向上增值发展,也可能穿过相邻层面转移和释放剪切应力,最终导致纤维断裂。二是随着应力继续增加,当裂纹尺寸超过临界值时发生破坏性断裂。

4.2 碳纤维微观的缺陷类型

碳纤维微观缺陷大体可分为表面缺陷和内部缺陷两大类。同样大小的缺陷,表面缺陷对其拉伸强度的影响要大于内部缺陷^[8]。

(1) 碳纤维表面缺陷。表面缺陷主要有微圆斑沉和物、微划伤和划痕以及微外裂纹。

(2) 碳纤维内部缺陷。内部缺陷主要有,一是内微裂纹,如晶间裂纹;二是纤维径向和轴向微裂纹,这些微裂纹和缺陷形成是制造时压伸过头和刺伤所致,其形状各异。犬牙交错的径向裂纹,三重径向裂纹;上下已错位裂纹等。

4.3 格拉菲斯微裂纹理论

纤维和固化剂等属于脆性材料,其拉伸强度受控于各类缺陷,缺陷愈大,强度愈低,服从于 Griffith 微裂纹理论,即:

$$C = \frac{\gamma}{\pi} \times \frac{2E}{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi C}} \quad (3)$$

式中: C 为基平面裂纹的尺寸(半径); γ 为表面自由能(4.2 J/m²); E 为杨式模量。

式(3)是脆性材料断裂力学的基础。此式把脆性材料中存在的裂纹等缺陷与拉伸强度关联在一起,拉伸强度随着裂纹尺寸的增加而降低,符合实际情况。因此,在生产碳纤维复合芯的过程中,采取各种技术措施降低和消除各种缺陷,以提高碳纤维复合芯的拉伸强度^[8]。

用电子显微镜从微观来研究复合芯中碳纤维微裂机理,缺陷类型和强度分散性等以及格拉菲斯微裂纹理论,都证明碳纤维复合芯导线不宜使用压缩型电力金具。

5 结束语

综上所述,碳纤维复合芯导线应用于输电线路工程时,不宜采用压缩型接续管和耐张线夹,只能使用楔型结构的接续管和耐张线夹。输电线路路上已经采用碳纤维导线压缩型电力金具的,理应全部更换为楔型电力金具,以免造成输电线路安全事故。

参考文献:

- [1] 严行建,王 澄.ACCC 导线的应用和金具的研制[J].电网与水利发电进展,2008(06):06-11.
- [2] 叶鸿声,黄伟中,王 彬.碳纤维复合芯导线在跨越增容改造工程中应用探讨[C].新型架空输电线路技术与应用研讨会论文集,2010.
- [3] 何州文,陈 新,王秋玲,等.国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J].电力建设,2010,31(4):90-93.
- [4] 尤传永.架空输电线路新型复合材料合成导线的开发和研究[J].电力建设,2004,25(11):1-6.
- [5] 王新营,严 波,等.架空导线用 50 kV 碳纤维增强复合芯的性能研究[C].新型架空输电线路技术与应用研讨会论文集,2010.
- [6] 上海玻璃结构研究所.玻璃钢结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1980.
- [7] 程应镗.送电线路金具的设计安装试验和应用[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [8] 贺 福.碳纤维及石墨纤维[M].北京:化学工业出版社,2010.

作者简介:

姜广东(1979),男,江苏盐城人,工程师,从事电力金具研究工作;

严行建(1945),男,湖南长沙人,高级工程师,从事输变电技术研究工作;

宋 丹(1985),女,安徽宿州人,助理工程师,从事输变电技术工作;

(下转第 64 页)

变电站 10 kV 消弧线圈接地调节方式及故障处理

刘方韩¹, 成 兵², 汪 晨², 乔向阳²

(1.南京邮电大学,江苏 南京 210046;2.芜湖供电公司,安徽 芜湖 241027)

摘 要:电力系统的中性点接地方式是一个综合性的技术问题,与系统的供电可靠性、人身安全、设备安全、绝缘水平、继电保护及接地装置都有密切关系。介绍了目前电力系统中变电站 10 kV 系统中性点接地方式的种类以及消弧线圈几种调节方式、补偿方式特点,分析了常见的故障类型,并给出相应处理方法,为检修人员的日常运行维护,保障设备的安全可靠运行提供参考。

关键词:消弧线圈;调节方式;故障处理;继电保护

中图分类号:TM864

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0060-05

随着电网规模的扩大,变电站 10 kV 出线增多以及电缆的广泛使用,系统发生单相接地引起的电容电流随之增大。新颁标准规定:10 kV 系统(含架空线路)单相接地故障电流大于 10 A 而又需要在接地故障条件下运行时应采用消弧线圈接地方式。因此,在变电站安装消弧线圈能减小故障点的残余电流,抑制间歇性弧光过电压及谐振过电压,对保证系统安全供电起到显著的作用。

1 变电站中性点接地方式的比较

1.1 中性点不接地方式

该中性点接地方式比较经济、简便,在接地电容电流较小的条件下,系统发生单相接地时的接地电弧可以瞬间熄灭,系统可带故障运行 2 h,供电可靠性相对较高,故世界各地不少中压电网仍在采用。不过在许多情况下,中性点不接地仅为一种过渡方式,随着电网的发展,当接地电容电流接近或达到某一临界值(一般为 10 A)时,往往会因间歇电弧接地过电压,接地电弧无法自动熄灭,容易发展成两相短路跳闸,导致事故范围进一步扩大。

1.2 中性点经小电阻接地方式

该方式的优点是:容易检出单相接地故障线路,永久接地时切除速度快,在消除间歇电弧过电压、防止谐振过电压等方面有优势。缺点在于跳闸率高,断路器工作负担重,瞬时性接地也跳闸,易造成用户短时停电,供电可靠性不高^[1,2]。另外,短路电流冲击对电缆绝缘造成的损伤较大,对电子通信设备的电磁干扰也比较严重,若故障不能及时跳开,电弧有可能连带烧毁同一电缆沟里的其他相邻电缆,从而扩大事故,造成火灾。

1.3 中性点经消弧线圈接地方式

当发生单相接地时,由于消弧线圈产生的感性

电流补偿了故障点的电容电流,使故障点的残流变小,从而达到自然熄弧,防止事故扩大甚至消除事故的目的。运行经验表明,消弧线圈对抑制间歇性弧光过电压和铁磁谐振过电压,降低线路的事故跳闸率,减少人身伤亡及设备的损坏都有明显的作用^[1]。

综上所述,变电站理想的中性点接地方式是,采用快速动作的消弧线圈作为接地设备,对瞬时性单相接地故障,能快速补偿,正确识别故障消除并迅速退出补偿;对非瞬时性单相接地故障,系统在消弧线圈补偿的同时在很短的时间(远小于 10 s)内能正确判断接地线路,将故障线路切除,从而提高配电网的供电可靠性^[3,4]。

2 消弧线圈调节补偿方式及特点

消弧线圈的调节方式可分为调匝式、调容式、调节短路阻抗式等。从补偿方式上分,有欠补偿、过补偿以及全补偿。其中调节方式又可分为预调式及随调式。预调式的消弧线圈在正常运行时其电感量在最佳补偿值,即在谐振点附近运行,残流和调谐度都控制在允许范围内。随调式自动补偿消弧线圈在正常运行时工作在远离谐振点的位置,这样中性点位移电压很低,不需要串入阻尼电阻器来限制串联谐振引起的位移电压的幅值^[4]。

目前芜湖供电公司管辖的变电站中,采用调匝式消弧线圈较多,约占消弧线圈总数的 57%,调容式占 32%,调节短路阻抗式占 11%。从调节方式上分,消弧线圈采用预调式数量较多,占总数 89%,随调式占 11%。

2.1 消弧线圈调节方式种类及特点

2.1.1 调匝式

调匝式消弧线圈工作原理如图 1 所示。在变电站正常运行时,有载调匝式消弧线圈是一带铁心的电感线圈,设有多档位分接头,通过有载开关调整分

接头的位置,实现改变消弧线圈的电感量。消弧线圈接在变压器或发电机的中性点上,当系统发生单相接地时,消弧线圈提供的感性电流与系统的电容电流相位相反,流过接地点的残流即为电感电流与电容电流的差值。调整电感电流,就可以使接地残流达到最小值,从而消除接地过电压。消弧线圈采用预补偿方式,即在系统发生单相接地前,消弧线圈已处于最佳补偿状态。调匝式消弧线圈装置补偿效果最佳,补偿速度快,无谐波,对瞬时性单相接地故障具有快速补偿能力,减少了系统由瞬时性单相接地故障发展成永久接地故障的几率^[5]。

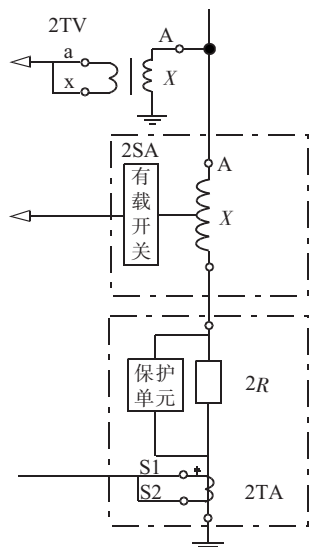


图1 调匝消弧线圈工作原理

一般采用变压器的有载调节机构或真空开关实现分接头的调节,电感值调节范围比较小,输出补偿电流有最小值的限制,只能达到额定值的1/2~1/3,且不能连续无级调节。由于调节分接头的时间较长,只能采用预调的工作方式,为防止电网正常运行的串联谐振,必须加上阻尼电阻。由于设备带有转动和传动机构,因而日常维护工作量较大。

2.1.2 调容式

调容式消弧线圈工作原理如图2所示,主要是在消弧线圈的二次侧并联若干组可控硅(或真空开关)通断的电容器,用来调节二次侧电容的容抗值。根据阻抗折算原理,调节二次侧容抗值,即可以达到改变一次侧电感电流的要求。

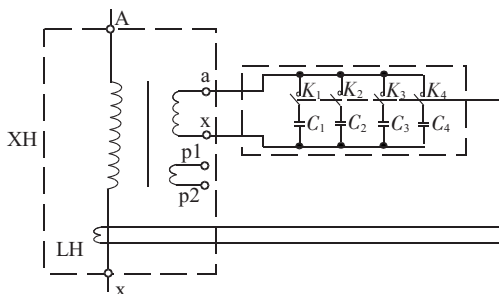


图2 调容式消弧线圈工作原理

电容器组的合理组合可使级差电流做得比较小,输出范围有所增加,调节速度也提高了不少,可以采用随调的控制方式,不用阻尼电阻。但是级差电流越小,开关执行机构的级数和数量就越多,需要综合平衡。特别需要注意的是,在用可控硅投切电容器组的情况下,可控硅的工况比较恶劣,对可控硅的安全运行不利。

2.1.3 高短路阻抗变压器式

高短路阻抗变压器式消弧线圈工作原理如图3所示,把高短路阻抗变压的一次绕组作为工作绕组接入10 kV系统中性点,二次绕组作为控制绕组由2个反向并接的可控硅短路,可控硅的导通角由控制器控制^[6]。调节可控硅的导通角在0至180°之间变化,使可控硅的等效阻抗在 ∞ 至0之间变化,则输出的补偿电流就可在0至额定值之间得到连续无极调节。

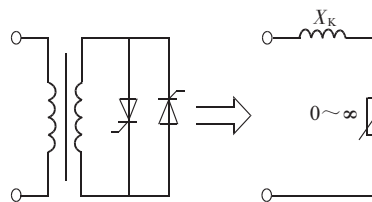


图3 高短路阻抗变压器式消弧线圈工作原理

系统在正常运行时,消弧线圈远离补偿工作点,一旦发生单相接地故障,立即将其调节到补偿工作点;而当接地故障解除时,又立即将其调节到远离补偿工作点。系统正常运行时消弧线圈处于远离与电网电容发生谐振的状态,因此可确保不会发生串联谐振,不需设置阻尼电阻,即随调试消弧线圈。该种消弧线圈的优点是响应速度快;接地残流小;伏安特性在0~110%额定电压范围内保持较好的线性度;输出补偿电流在0~100%额定电流范围内可连续无级调节。但是对可控硅的工作状态要求较高,若二次回路发生故障,不能实现随调,有可能导致接地残流过大。

2.1.4 调气隙式

将电感线圈的铁心制成带有气隙的型式,利用气隙长度的改变实现励磁阻抗的改变。一般采用步进电机利用转动、传动机构实现气隙的调节^[7]。该型产品具有与调匝式一样的缺点,而且其装置更为复杂,较易损坏,调节过程噪音较大,调节速度慢。与调匝式不同的是,其输出的电流可以连续无级调节,但仍然有一个最小补偿电流的限制。

2.1.5 直流偏磁式

对电感线圈的铁心注入直流磁通,通过改变直流电流的大小改变铁心的磁饱和程度,从而改变励磁阻抗,直流电流通过可控硅来进行调节^[8]。由于采

用可控硅技术,调节速度大大提高,可以采用随调的控制方式,补偿电流可以连续无级调节。但仍有最小值的限制,且装置比较复杂,谐波要采取特别的措施加以解决。

2.2 消弧线圈补偿方式种类及特点

消弧线圈共有过补、欠补、全补偿3种运行方式,根据有关规程,消弧线圈一般均运行于过补偿方式下。这主要是考虑到当系统切除线路时,不会运行在谐振状态。

2.2.1 欠补偿

指系统电容电流 I_C 大于线圈电感电流 I_L 的运行方式,即 $I_C - I_L > 0$ 。在欠补方式下,显示器的“残流”显示第一位为“+”,表示残流为容性。

2.2.2 过补偿

指系统电容电流 I_C 小于电感电流 I_L 的运行方式,即 $I_C - I_L < 0$ 。过补方式下,显示器“残流”显示符号为“-”,即残流为感性。

在满足 $I_C - I_L < 0, |I_C - I_L| \leq I_d$, 其中 I_d 为级差电流,即在残流为感性、且残流值 $\leq$ 级差电流时,消弧线圈不进行调档操作。当系统对地电容变化,不能满足上述条件时,则消弧线圈自动向上或下调节分头,直至重新满足上述条件。在过补偿方式运行时,接地残流值将不大于级差电流 I_d 。

2.2.3 全补偿

此时,系统的电容电流与消弧线圈补偿的电感电流相等。由于阻尼电阻的作用,系统可以在此方式下运行,但此时中性点电压偏高,故一般不选择此种方式。

目前,实际运行中对于脱谐度一般不作要求。当发生接地故障时,要求系统经过补偿后的接地残余电流不大于 $3 \sim 5 \text{ A}$ 。

3 系统对地电容电流测量原理

正常运行中系统零序等值回路如图3所示。

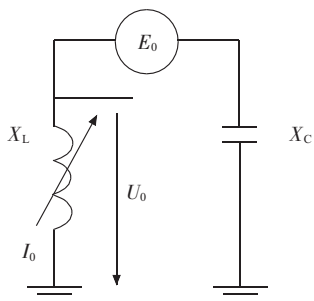


图3 系统零序等值回路

其中 E_0 为系统不平衡电压,该电压是系统的三相对地电容不完全相等形成的固有不平衡电压与接地变压器中性点产生的对地电压的合成值; X_L 为

消弧线圈电抗; X_C 为系统对地电容; I_0 为流过消弧线圈的不平衡电流(回路电流)。

由图3可知,消弧线圈与系统对地电容对于系统不平衡电压 E_0 形成串联谐振回路,当系统对地电容固定时,中性点电压 U_0 与消弧线圈电抗的谐振曲线如图4所示。

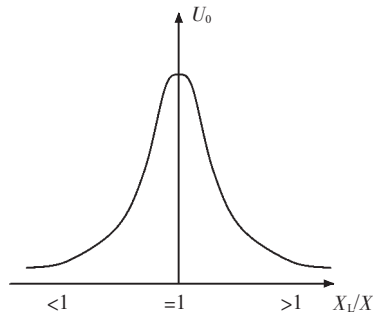


图4 中点电压与消弧线圈电抗的谐振曲线

设消弧线圈处于某一档位,其电抗为 X_{L1} ,根据回路电压定律有:

$$E_0 = I_{01} \times X_{L1} - I_{01} \times X_C \quad (1)$$

改变消弧线圈档位,设改变后的电抗为 X_{L2} ,则:

$$E_0 = I_{02} \times X_{L2} - I_{02} \times X_C \quad (2)$$

系统不平衡电压 E_0 不随消弧线圈的电抗变化而改变,因此有:

$$I_{02} \times X_{L2} - I_{02} \times X_C = I_{01} \times X_{L1} - I_{01} \times X_C \quad (3)$$

所以:

$$X_C = (I_{01} \times X_{L1} - I_{02} \times X_{L2}) / (I_{01} - I_{02}) \quad (4)$$

该计算系统对地容抗的方法即为位移电压法。

4 常见的故障原因及处理方法

运行中的消弧线圈设备对系统的安全至关重要。当 10 kV 系统发生单相接地时,会导致接地点的残留过大,甚至发展成为相间故障,从而使故障范围进一步扩大。因此了解消弧线圈的常见故障及其处理方法,有助于专业检修维护人员快速展开故障抢修,确保设备安全。以下就消弧线圈设备在运行过程中易发生的几种故障及原因、处理方法结合实例进行分析。

4.1 消弧线圈投运/未投运

10 kV 系统消弧线圈中性点电流小于设定的门槛值(一般在 $20 \sim 50 \text{ mA}$)或者中性点一次电压小于 3.5 V 。

处理办法。观察中性点电流、电压情况,消弧中性点一次电压大于 3.5 V ,自检报投运。检查中性点一次电压是否大于 3.5 V 。检查中心点电流门槛值是否被重新整定。

调容式消弧线圈,检查调容箱内电容是否有衰

减情况,同时减小阻尼电阻的阻值。调匝式消弧线圈只需将阻尼电阻的阻值减小即可。

具体案例。芜湖供电公司 220 kV 鸠江变 10 kV 2 号消弧线圈,曾于正常运行过程中,在 1 号接地变 017 开关处于合位状态下,发出“2 号消弧线圈未投入运行”信号。经现场检查,一次设备及二次控制部分,均未发现有明显异常。但是其中性点电流值大约在 0.004~0.009 A 之间波动,此时系统 10 kV 出线约有 12 条在运行,电流明显偏小。

此时调节门槛值也无济于事,因为其最小值为 20 mA。最终停下一次部分,经检查,调容箱内 1 只电容由于达到工作年限发生衰减,导致控制器计算中性点电流不准确,未达到消弧线圈正常运行所需的最小电流值。因此发出“2 号消弧线圈未投入运行”信号。

4.2 消弧线圈调档失败

控制器发出调档命令后,未监测到相应的变档信息。

处理办法。一次设备的监测,调容式消弧线圈监测电容箱内是否有故障,包括电容是否损坏、真空开关是否故障。调匝式消弧线圈监测有载开关是否故障(包括有载电机和航空插头以及档位分接头)。连接设备的监测,执行机构包括继电器以及相关器件是否故障,连线是否接通。

具体案例。芜湖供电公司 110 kV 吉和变,原 1 号消弧线圈为调匝式设备。经常在运行过程中发出“调档失败”信号。调档信号是由其控制部分发出,经检修人员检查,现场控制部分并无异常,所有电压电流计算均符合系统运行实际情况。于是着重检查有载调压开关是否运行正常。经停电后检查发现,有载调压开关的控制电源跳闸,导致调压电机失去工作电源,在控制器发出调档信号后,并未检测到现场实际档位的变化,因此发出“调档失败”信号。

4.3 中性点位移超限

母线 PT 开口三角电压超过 $15\%U_{\text{额}}$ (当中性点电压超过 $15\%U_{\text{相}}$ 时该信号输出,发生接地时该信号有输出)。

处理办法。若发生接地时,该信号输出为正常,无需处理;若未发生接地,则需检查中性点电压为何太高。应当首先查看系统三相负荷有没有因为其他原因造成严重不平衡,当发生单相接地故障时,检查母线互感器一次侧中性点是否连接有消除谐振的设备接地。如果有,应去除,因为消弧线圈的接头已经改变了系统电感参数,起到防止铁磁谐振的作用。

4.4 档位到底和档位到顶

消弧线圈运行在最低档或最高档。

处理办法。调容式消弧线圈在最低档(0 档)时补偿电流最大,最高档时补偿电流最小;调匝式消弧线圈在最低档(1 档)时补偿电流最小,最高档时补偿电流最大。此时注意观察,必要时可以相应改变一档(接地时严禁操作),因为预调谐装置在偏离谐振点太远的档位将无法保证计算的准确性,也无法正常自动跟踪补偿。如果容量不适的报警同时出现,检测系统电容电流,确定是否消弧线圈的容量不适合系统的要求。

4.5 装置故障

控制器出现故障,主机与触发控制板之间的通信异常,触发异常等。

处理办法。检查电源是否故障,以及控制器内部半间是否故障。断开控制器电源,检查触发控制板是否插牢,板表面是否有异常现象。检查同步信号回路、控制柜可控硅回路。

4.6 消弧线圈残流超标(补偿失败)

残流大于设定值时,检查是否与容量不适同时出现,以此确定消弧线圈容量是否已经不适合当前系统的要求。

4.7 母线电压异常

母线电压 U_{ab} 二次值小于 10 V(此时装置将停止系统电容电流的测量)。

处理办法。检查母线 PT 电压以及连接线,确定是否因为 PT 异常引起,或因为连接线虚接引起故障报警。

4.8 中性点电压异常

中性点电压低于设定电压,中性点电压一般在 30~200 V。

处理办法。检查中性点电压是否满足设定值。可能原因是该段投运的出线过少,可调节接地变分接头调整。

5 结束语

电力系统的消弧线圈调节方式及运行维护是一个系统工程问题,在日常的维护过程中,应当重视总结与借鉴国内外电力系统正反两面的运行经验,减少事故,节约运行成本,更好更快地建设经济稳定的电网,以满足国家现代化和人民生活水平不断提高的需要。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].第 2 版.北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 要焕年,曹梅月.优化谐振接地方式前景趋好[J].电力设备,2005,6(10):33-37.
- [3] 陈柏超,陈维贤,尹忠东,等.10 kV 电网新型自动调谐消弧线圈及控制装置[J].中国电力,1997,30(9):70-71.

[4] 李景祿,李朝晖.自动补偿消弧装置用于配电网若干问题的讨论[J].高低压技术,2001(6):37-39.

[5] 李福寿.消弧线圏自动调谐原理[M].上海:上海交通大学出版社,1993.

[6] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.

[7] 要焕年,曹梅月.参数增量法在优化谐振接地中的应用[J].电力设备,2000,1(3):21-24.

[8] 李润先.谐振接地是我国中压电网最理想的接地方式[J].高电压技术,1994,20(1):40-43.

作者简介:
刘方桦(1990),男,江苏南京人,本科,南京邮电大学自动化专业在读。

成 兵(1967),男,安徽芜湖人,工程师,从事接地变、消弧线圏自动控制、站用电系统、直流系统工作;

汪 晨(1983),男,安徽芜湖人,助理工程师,从事变电运行等工作;

乔向阳(1984),男,安徽芜湖人,助理工程师,从事变电检修等工作。

Fault Disposing and Regulating Modes of Arc Suppressing Coils Grounding
in 10 kV Substation

LIU Fang-wei¹, CHENG Bing², WANG Chen², QIAO Xiang-yang²
(1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China;
2. Wuhu Power Supply Company, Wuhu 241027, China)

Abstract: The neutral grounding of power system is a comprehensive technical problem, which relate to power reliability, personal safety, equipment safety, insulation level, protective relaying and grounding device closely. The types of neutral grounding and the regulating and compensation modes of arc suppressing coils in 10 kV substation system are introduced. And the common fault types and their corresponding disposal methods are also analyzed, which can provide references for daily operation and maintenance and ensure the safety and reliability of power equipment.

Key words: arc suppressing coils; regulating mode; fault disposing; protective relaying

(上接第 59 页)

全 娜(1986),女,江苏宿迁人,助理工程师,从事输变电技术工作;

严晓威(1988),男,湖南长沙人,助理工程师,从事导线技术网络研究工作。

Research on the Selection of Power Fittings based on the Pressure Contact
Characteristics of Carbon Fiber Wire

JIANG Guang-dong¹, YAN Xing-jian², SONG Dan², TONG Na³, YAN Xiao-wei⁴
(1.Nanjing Electric Power Fittings Design and Research Institute, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Hongyuan Electric Power Construction Supervision Co.Ltd., Nanjing 210024,China; 3. Jiangsu Yiding Power Technology Co.Ltd., Suqian 223800, China; 4. Far East Composite Technology Co.Ltd., Yixing 214257, China)

Abstract: The common characteristics, respective physical property and mechanical property of this material including carbon fiber, glass fiber and epoxy resin hardener are analyzed in the paper. Besides, the production process and structure of composite core wire are studied. Based on the operation characteristics of power transmission line, through survey, analysis and experiments, it is proposed that the compressed type power fittings are not suitable for carbon fiber composite wires in power transmission project just in case for the wire fracture accidents. In order to ensure the safety of carbon fiber composite core line, the wedge type power fittings can only be applied.

Key words: carbon fiber; composite core; wire; compression; power fittings; analysis

广 告 索 引

江苏省电力设计院	封面	《江苏电机工程》协办单位	前插 4、5
南京远能电力工程有限公司	封二	宿迁电力设计院有限公司	(黑白) 文前 1
江苏南瑞淮胜电缆有限公司	前插 1	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南京南瑞集团有限公司	封底

地县一体化系统厂站监控信息的无缝接入

陈 艳

(扬州供电公司,江苏 扬州 225009)

摘 要:介绍了扬州地区调度自动化系统升级为地县一体化系统的过程中,采用前置多点数据源的方法解决主站端调度信号与监控信号不对应的问题,实现了县调变电站监控信息无缝接入地县一体化系统。

关键词:调度自动化;地县一体化;厂站;主站;无缝接入

中图分类号:TM734

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0065-02

为适应“大运行”体系建设要求,扬州供电局建设一套“大运行”技术支持系统即地县一体化系统,在现有的地调运行系统上进行软硬件平台升级改造,升级过程中不能影响现有调度自动化系统的用户对电网的监控。在完成系统平台升级后,县一体化系统实现各县公司所有变电站监控信号的直采直收。但由于县公司原系统 110 kV 以上变电站的实时信息按照监控功能直采直收,而地调自动化系统对 110 kV 以上变电站的实时信息按照调度信息要求定义采集,将原县调变电站按照监控信息要求接入地调系统时,由于县、地调所收信息的“三遥”点号不同,原县调通道直接接入地调系统时与原系统定义点号不对应,影响地调的信号采集,从而影响系统用户对电网的监控。如何实现调度信息向监控信息的无缝切换,同时不影响向省调的数据转发,是专业技术人员需要解决的主要问题。

1 县调厂站端信息接入方案

1.1 修改厂站端调度转发表

为实现原县调变电站调度信息向监控信息的无缝切换,必须保证厂站端新的监控信号接入通道数据与原地调自动化系统中的“三遥”数据定义一致。在保持地调调度自动化系统原有厂站“三遥”信息表顺序不变的前提下,将新需要的监控信号添加到原点表后进行排序,再采用变电站厂站端修改地调转发信息表,将监控要求的信号在变电站厂站端进行添加并转发,即保持原有“三遥”信号顺序不变,将按监控信号规范新增的信号在主站和厂站同时添加。该方案在厂站接入切换期间需要对变电站端自动化总控装置进行重新组态下装,会有信号的短时中断,不能实现信息的真正无缝接入,同时存在一定的安全风险;在变电站侧大规模修改调度转发表,出错概率比较大,同时要求对所有监控信号都进行试验,厂站端工作量比较大。

1.2 主站端前置多点数据源进行数据处理

采用前置多点数据源,在主站前置上对同一测点 ID 定义多条记录,不同记录对应于该厂站的不同通道和点号,即主站前置机可对同一测点 ID 进行多点数据源的处理,通过主站端人工切换值班通道实现采用哪个数据源进行后台处理,厂站端只要将原转发县调的通道直接转发地调即可。该方案可实现地县一体化系统厂站监控信息的无缝接入,对系统用户的业务使用无任何影响。但需在主站系统中添加许多相同测点 ID 的记录,导致数据库记录的管理复杂,对调度主站系统维护人员的要求比较高。

2 主站端前置多点数据源数据处理方法

比较上述 2 种方案,从安全性、易操作性等方面综合考虑,在扬州地县一体化系统升级改造过程中采用前置多点数据源进行数据处理,而厂站端只要将原转发县调的通道直接转发地调即可。

2.1 厂站接入切换前的准备

地调主站端。扬州地调自动化系统为南瑞科技 OPEN 3000 系统平台,在地调 OPEN 3000 系统按照监控要求维护好以上变电站的图形、数据库资料;地调系统与原县调转发点号冲突的遥测、遥信信息,利用前置多点数据源的方法,在 FES 类表中复制所有冲突记录,并按县调直采的通道遥测、遥信号录入新点号。同时在数据库新建该厂站新的网络 104 通道,通道参数与现有县调通道参数一致,为便于排序搜索,FES 类遥测、遥信表通道一、二域暂不填写、通道三域填写新的网络通道。

变电站厂站端。厂站端做好总控单元的数据备份,遥控试验前将站内所有断路器、隔离刀闸、接地刀闸等的远方遥控出口闭锁(断开)。

2.2 厂站接入切换的具体实施方案

扬州地区调度地县一体化系统实时数据采集现状如图 1 所示。

变电站厂站端。需接入的变电站地调原有采集

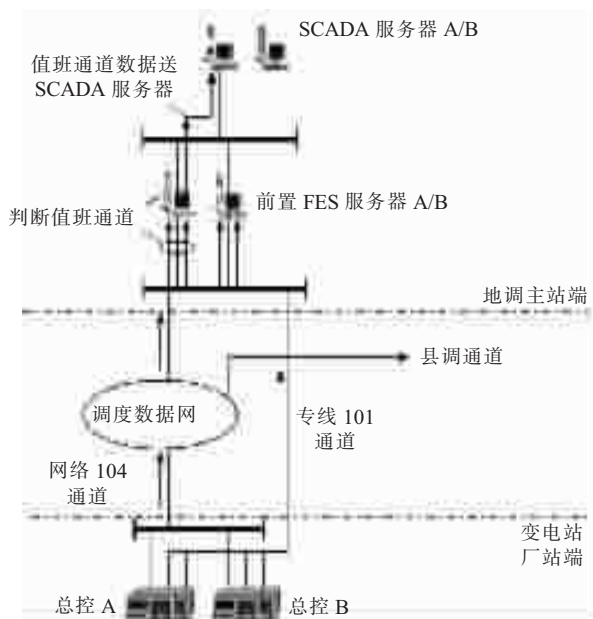


图 1 扬州地区调度地县一体化系统实时数据采集现状

通道两路,一路网络 104、一路专线 101,对于厂站端有 2 台远动总控单元^[1]的变电站,为不影响系统数据的实时采集,在确认值班总控的前提下,厂站端首先在第一台远动总控单元(备机)进行配置,新建到地调系统的 104 规约链路,转发信息表应同县调转发信息表一致,并下装到备用总控单元,重启总控单元,启动结束后将该总控升为值班总控,此时对厂站端值班总控来说,向地调转发的专线 101 通道不变,新建的向地调转发网络 104 已采用与县调一致的转发信息表。

地调主站端。先调试新建的网络 104 通道,同时保证原专线 101 通道值班不变,利用新建的网络 104 通道的前置数据与县调系统进行核对。信息核对无误后,主站切换新 104 通道为值班通道,检查状态估计等软件运行情况,并进行遥测、遥信、遥控预置试验。由于新建通道在值班前已经进行了前置数据的核对,将该通道转为值班通时发往 SCADA 后台的已经是正确的数据,所以对系统用户来说该切换是无缝的,该切换方案对系统实时数据处理无

任何影响。

新建网络 104 通道调试成功后,按照同样的方法可进行专线 101 通道和备用总控装置的配置切换,将地调 2 路通道网络 104 通道、专线 101 通道在厂站端均切换为与县调相同的调度转发表。采用该切换方案,在厂站端只进行调度转发表的简单复制,降低了厂站端的安全风险,增加地调系统管理人员对于厂站端监控信号接入的可控度,实现了地调自动化系统所采集的变电站信号由调度信号向监控信号的转变,厂站无缝接入了地县一体化系统。

3 结束语

在扬州地区调度自动化系统升级为地县一体化系统的过程中,县调所属变电站监控信号的无缝接入在线运行系统是升级工作的重点。为了不影响调度员等系统用户的业务使用和向上级调度实时信息的转发,经多种方案筛选,最终采用了前置多点数据源的方法解决了由于厂站端地、县调转发表不一致导致的主站端调度信号与监控信号点号不对应的问题。同时降低了厂站端的安全风险,增加地调系统管理人员对于厂站端监控信号接入的可控度,实现了县调变电站监控信息无缝接入地县一体化系统,将扬州地区调度自动化系统成功在线升级为“大运行”技术支持系统地县一体化系统。地县一体化主系统设置在扬州供电公司本部,数据采集功能由分布在扬州供电公司及仪征、江都、高邮、宝应县 4 个县供电公司的广域节点共同完成,从而实现一地区一系统平台,为扬州电网的“大运行”体系建设提供了有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 张永健.电网监控与调度自动化[M].北京:中国电力出版社,2004.

作者简介:

陈 艳(1978),女,江苏扬州人,工程师,从事电力系统自动化工作。

Seamless Access of Plant Station Monitoring Information in City-county Incorporate System

CHEN Yan

(Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The update process of dispatching automation system to city-county incorporate system in Yangzhou is introduced in the paper. And the problem that the dispatching signal and the monitoring signal are not corresponding is solved through lead more data sources method. Thus the seamless access of plant station monitoring information in city-county incorporate system is realized.

Key words: dispatching automation; city-county; plant station; master station; seamless access

电网电压暂降对用电客户的影响及对策

陈晓华
(淮安供电公司,江苏 淮安 223002)

摘 要:随着现代企业电子设备的大量应用,电子元器件对电压暂降的敏感不尽相同,部分元器件常因电压暂降而停止工作,导致整套设备受到影响。针对电网电压暂降引起用户内部设备欠压保护动作导致设备停电,分析了发生电压暂降的原因及危害,并结合案例提出了改进建议。

关键词:电压;暂降;保护;电能质量

中图分类号:TM743 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2012)03-0067-02

电压暂降指供电电压突然减小到规定的暂降限值以下,随即在短时间隔后恢复。在电网中这种现象的持续时间大多为 0.01~1.5 s。GB/T 17626.11—2008 规定了半导体设备在电压暂降深度 40%、持续时间 200 ms 时设备应能稳定工作的要求^[1]。随着现代企业电子设备的大量应用,电子元器件对电压暂降的敏感不尽相同,部分元器件常因电压暂降而停止工作,导致整套设备受到影响。

1 用户反映的问题

某公司用户反映 2010~2011 年共有 30 次 20 kV 停电情况,经该地区电力企业调度记录核实,该用户所在线路故障 5 次;其余 25 次均为其他线路故障,导致系统电压暂降,该用户内部设备欠压保护动作致使其自身停电。其欠压保护动作时限为 40 ms。经故障录波装置查询,并对查询的故障录波数据进行了整理,结果如表 1 所示。

项目	三相电压 /V			三相电流 /A		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
故障前	97.1	10.6	90.7	0.7	5.1	0.7
故障中	22.2	21.8	21.4	47.6	48.5	49.5

根据故障录波数据和用户反映情况,引发用户内部设备欠压保护跳闸的原因是 20 kV 电网发生短路事故时的电压暂降。暂降深度 A 相 38.5%,B 相 37.8%,C 相 37.1%,持续时间低于 200 ms。

2 电压暂降的原因分析

导致电压暂降的原因有多种,有自然因素,也有人为因素,有供电部门系统保护的因素,也有企业内部的设备原因和误操作等。

自然因素,如雷击闪电等击打在输电线或绝缘子上,大风导致输电线舞动,杂物搭在输电线上引

起短路。

人为原因,如车辆造成输电线杆倒塌,放风筝导致输电线短路,伐树倒在输电线上,野蛮施工导致挖断地下电缆等,从而造成保护设置动作。

供电部门保护装置误动作,线路绝缘爬距达不到标准发生雾闪,防治鸟害不及时造成短路,线路巡视不到位等。

企业原因,如感应电动机启动时,需要从电源汲取的电流最大可达到满负载的 500%~600%,如此大的电流经过阻抗时,引起电压突然下降;误操作短路可能会引起系统远端供电电压较为严重的跌落。企业间的影响,某个企业内部产生的电压暂降反馈回电网,从而影响其他企业的电压。企业电工业务不熟,带故障送电,导致短路^[2]。

3 电压暂降的危害及防治

3.1 电压暂降的危害

目前的工业生产中,电子电力设备大量应用,如 PLC、变频器、总线、接触器、继电器、控制器等。这些元器件对电压暂降的敏感不尽相同,一旦某个元器件因电压暂降停止工作,整套设备或流水线都会受到影响,造成一定的经济损失。

3.2 电压暂降的防治

- 防治电压暂降的措施主要包括以下方面。
- (1) 剪树作业,架设屏蔽导线,架空线入地等。减少线路故障次数,可降低电压暂降的发生频度。
 - (2) 改进继电保护技术,在配电网中需要柱上断路器快速切除故障。
 - (3) 对电网进行改进,避免发生故障时在某一特定地点发生严重电压暂降。可行方法有限制同一供电母线上的架空馈线数、关键位置处装设电源等。
 - (4) 在系统和敏感负荷之间装设蓄电池储能系统(BESS)、动态不间断电源(DUPS)、机械切换开关(DUR)、超导磁能系统(SMES)、静止电子分接开

关(SETC)、固态切换开关(SSTS)、静止无功补偿器(SVC)、不间断电源(UPS)^[3]。

(5) 对终端用户设备进行改进,提高设备的免疫能力。

4 电压暂降治理案例

上海通用汽车厂饱受电压暂降引起的停产之苦,2004年1月~2005年7月,多次发生因电压暂降而引起停机停产事故。2005年6月进行综合治理,利用动态电压暂降补偿器,对抗电压暂降性能较差的敏感设备进行保护;根据各种工艺的不同要求对某些敏感设备进行软件参数调整,增强其电压暂降免疫能力并同时满足加工工艺的要求。治理方案实施后,该厂自2005年6月至2008年12月经历了12次电压暂降事故,经过治理的敏感设备和工艺都能安全跨过电压暂降干扰,确保了设备正常运行;而未经治理的同类设备和工艺,都受到不同程度的电压暂降干扰,致使部分生产设备和工艺出现故障或停止运行。为此,该厂已于2009年初对敏感的生产设备和工艺进行全面的电压暂降治理,彻底消除由电压暂降对汽车生产造成的不利影响。

5 改进实效及建议

该地区20 kV电网总体薄弱,故障发生较多,已制定相应措施,尽可能减少故障发生次数;加强运行维护,减少电网故障次数。

一是针对鸟类多、雷电多发、超高树木较多等情况,加强运行维护力度,结合停电检修,对线路避雷器进行检测,发现不合格的立即更换,累计更换了16只避雷器。为防止鸟害对线路的影响,及时对线路的裸露部分加装绝缘护套,累计加装了18处。对90组接地电阻进行测试;对185棵通道外超高树木全部清理到位。

二是针对电缆施工较多,实施全过程旁站监督,电缆头制作采取实名制管理;对现有的182只电缆头,在高峰负荷时进行了红外测温,无异常。

三是针对外力破坏,严格执行施工许可审批程序;每天对所有20 kV线路进行巡视,确保线路安全

运行。

经过以上改进,该地区20 kV跳闸由一年30次降为4次,大大提高了供电可靠性。

用户设备对电压暂降敏感程度较高,为保障可靠供电,彻底消除电压暂降的影响,提出如下建议:

(1) 重新确定负荷等级,进行双回路供电,同时加装SSTS,保证一回路发生电压暂降时可在一个周期内切换进线;

(2) 用户和设备生产厂家共同优化生产过程,降低设备对电压暂降敏感程度,并由相关单位采用电压暂降发生器对设备进行电压暂降测试,重新确定欠压保护定值;

(3) 根据生产过程确定敏感负载,由相关技术企业提出用户侧解决方案加装稳压装置。

6 结束语

随着新型电力电子设备在电力系统中的广泛应用,电压暂降已日益成为电力设备安全运行的一大隐患,为减少电压暂降对敏感负荷的影响,仅从电力系统着手,无法彻底防止问题的发生。电力部门有责任为用户提供本系统电压暂降的详细信息,用户应根据实际情况选购新设备,或者为保证设备的安全运行采取必要的技术措施;而设备制造行业也应重视设备对电压暂降的敏感程度,提供相应的技术参数描述设备对电压暂降的免疫能力。总之,解决电压暂降所带来问题的关键在于电力部门、电力用户和设备制造商的密切合作。

参考文献:

- [1] 宋云亭,郭永基,张瑞华.电压骤降和瞬时供电中断概率评估的蒙特卡罗仿真[J].电力系统自动化,2003,27(18):47-51.
- [2] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 刘悦,李勇,刘金陵.电能质量电压暂降问题及应对方案[J].山东冶金,2008,30(5):51-53.

作者简介:

陈晓华(1975),男,江苏泗洪人,工程师,从事变电设计研究工作。

Influences and Countermeasures of Grid Voltage Sags on Power Custome

CHEN Xiao-hua

(Huaian Power Supply Company, Huaian 223002, China)

Abstract: With the large number of applications of electronic equipment in modern enterprise, the responses of grid voltage sag of different electronic components are different. Part of the components may stop work due to voltage sags, which may leads to the whole equipment affected. For the low-voltage protection of internal equipment action caused by voltage sags, the cause and damage of grid voltage sags are analyzed. Besides, suggestions are proposed to improve such cases.

Key words: voltage; sag; protection; power quality

EDPF-NT 分散控制系统在某 1 000 MW 机组中的应用

柳倩,裴玉良,任志平,刘桂生
(国电谏壁发电厂,江苏 镇江 212006)

摘要:简述了 EDPF-NT 控制系统的结构特点,以及该项目在国电谏壁发电厂 1 000 MW 机组中基本网络布置和控制系统运用至今存在的优缺点,重点介绍了国内机组中首次成功运用全国产 DCS 控制系统实现单元机组炉、机、电集中控制,完成单元机组主辅机及系统的检测、控制、报警、联锁保护、诊断、机组启/停、正常运行操作、事故处理和操作指导等功能,以及其主要的控制策略。

关键词:EDPF-NT;控制系统;应用

中图分类号:TM621.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0069-04

国电谏壁发电厂首台 1 000 MW 超超临界机组于 2011 年 5 月 21 日顺利通过了 168 h 考核运行,正式投入商业运行。这是我国首台采用自主化成套控制系统(北京国电智深控制技术有限公司生产的 EDPF-NT 控制系统)的 1 000 MW 超超临界机组。该项目是国家高技术研究发展计划(863 计划)重要课题,该控制系统的投入运行打破了进口控制系统独占我国百万机组控制系统的局面。

1 系统概述

国电谏壁发电厂 2×1 000 MW 机组采用二机一控方式及 2 台机组合用一个集中控制室,单元机组以分散控制系统(DCS)为核心,分 3 个域进行控制,分别为 13 号域、14 号域及公用系统 34 号域。该系统基于最新计算机嵌入系统技术和现场总线技术开发的分布式控制系统,能够实现对单元机组主辅机及系统的检测、控制、报警、联锁保护、诊断、机组启/停、正常运行操作、事故处理和操作指导等功能。显示器和键盘作为机组的主要监视和控制手段,设置少量必要的紧急事故停止和启动按钮,以便在 DCS 出现故障时,确保机组安全停运。DCS 主要完成主厂房内单元机组和公用部分的系统及其设备的报警、调节和联锁保护等监视功能,包括锅炉、汽轮机、发电机、空冷系统及相关的辅助系统与设备。

每个 I/O(输入/输出)模块具有独立的现场总线通信节点,具有先进、可靠和易用多个特点。

控制系统有操作员站、工程师站、历史站、输出设备、分布式处理单元(DPU)及 IO 模块、电源、机柜等组成。通过高速网络构成的局域网将这些设备连接,实现数据在设备中的传递、交换和共享。

分布式处理单元(DPU)是系统最基本的控制

元。其中主控制器采用嵌入式设计的低功耗高性能计算机,内置实时多任务软件操作系统和嵌入式组态控制软件,将网络通信、数据处理、连续控制、离散控制、顺序控制和批量处理等结合起来,形成了较为稳定可靠的控制系统。软件采用 Microsoft windows XP 操作系统,DPU 站使用 Linux,应用软件为国电智深自主开发的 EDPF-NT PLUS 应用软件,还包括 Microsoft Excel、Visio 等工具以及第三方支撑工具,软件拥有开放的结构,可以和其他的控制软件实现数据交换功能。

系统网络采用工业以太网冗余配置(如图 1 所示),可快速构建星型或环形拓扑结构的高速冗余的安全网络,符合 IEEE802.3 及 IEEE802.3u 标准,基于 TCP/IP 与实时工业以太网协议,通信速率 10/100 Mbps 自适应,传输介质为带有 RJ45 连接器的 5 类非屏蔽双绞线或单模或多模光纤。在该网络结构中,一个系统包含多个既相互独立又可以集中监控的域,一个域一般是一个相对独立的子系统,域间信息可以按要求进行有选择的隔离和交互,域间信息交互可以实现局部集中监控或全厂集中监控。图示模块为每个独立的工作域。

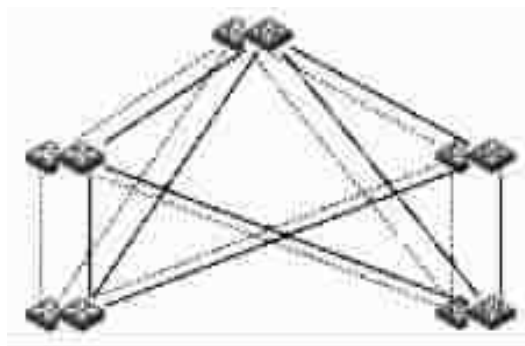


图 1 冗余全网状互联

控制网(CNET)是现场控制站的内部网络,实现控制机柜内的各个 I/O 模块和主控单元之间的相互

连接和信息传输,通信速率 1.5 Mbps,传输介质为屏蔽双绞线或光纤,系统网络和控制网络分别完成相对独立的数据采集和设备控制等功能,有效隔离工业自动化系统和 IT 系统。

2 控制系统硬件组成

1 000 MW 机组 DCS 控制系统实现了单元机组炉、机、电集中控制,完成单元机组主辅机及系统的检测、控制、报警、联锁保护、诊断、机组启/停、正常运行操作、事故处理和操作指导等功能。机组自动控制系统功能完善,满足机组在电网中主要承担基本负荷,同时也能够满足电网调峰、调频运行的控制要求,其成套控制系统实际配置情况如下:

(1) 接入的全部测点 14 139 个,其中单元机组硬接线点 11 693 个、公用系统硬接线点 1 649 个、通信接口接入测点 797 个。

(2) 控制的设备总数量 1 176 台,其中单元机组控制 1 084 台、公用系统控制 92 台。

(3) 上位机站总共 12 台,其中操作员站 5 台、工程师站 3 台、历史站 1 台、多功能接口站 1 台、SIS 接口站 1 台、大屏幕站 1 台。

(4) 控制站总共 51 对,其中单元机组冗余控制器站 45 对、公用系统冗余控制器站。

(5) 主干网网络交换机总共 14 台,为星形、冗余结构,其中单元机组 12 台、公用系统 2 台。

DCS 系统主干网网络负荷<10%,单个节点最大网络负荷小于 3%,画面操作相应周期≤1 s,画面数据刷新周期<1 s,SOE 数据采集周期<1 ms,实时数据控制周期≤50 ms,冗余控制器可实现正常无扰切换,控制器满足无扰在线下装要求,当控制器掉电或控制器停运时模拟量输出和开关量输出保位功能正常,控制器电源适应能力正常。

3 控制策略

1 000 MW 机组配套锅炉是上海锅炉厂引进德国 ALSTOM 公司超超临界塔式锅炉技术生产的 3 040 t/h 超超临界螺旋管圈直流炉,型式为单炉膛塔式布置、四角切向燃烧、摆动喷嘴调温、平衡通风、全钢架悬吊结构、露天布置、采用机械刮板捞渣机固态排渣的锅炉。锅炉制粉系统采用直吹式系统,每台锅炉配置 6 台中速磨煤机。汽轮机是上海汽轮机有限公司引进德国西门子技术生产的 1 000 MW 超超临界汽轮发电机组,一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、凝汽式、八级回热抽汽。发电机是上海汽轮发电机有限公司引进德国西门子公司技术生产的 THDF 125/67 型三相同步汽轮发电机。控制系统设

计包含了数据采集系统(DAS)、锅炉燃烧管理系统(BMS)、模拟量控制系统(MCS)、顺序控制(SCS)系统。汽机控制系统采用上海汽轮机有限公司和西门子联合设计的 DEH 控制系统(数字控制部分也采用西门子 T3000 分散控制系统)。其中协调控制系统(CCS)和机组快速减负荷(RB)是该控制系统的特点。

3.1 单元机组 CCS 策略

该控制策略基于国电谏壁发电厂 13 号机组选用的主设备,采用以下先进控制策略:以燃料量控制锅炉负荷、以给水量控制微过热汽温(焓值),解除给水量调整时对燃料量的耦合作用,且负荷调整时兼顾对汽温的控制。CCS 策略如图 2 所示。

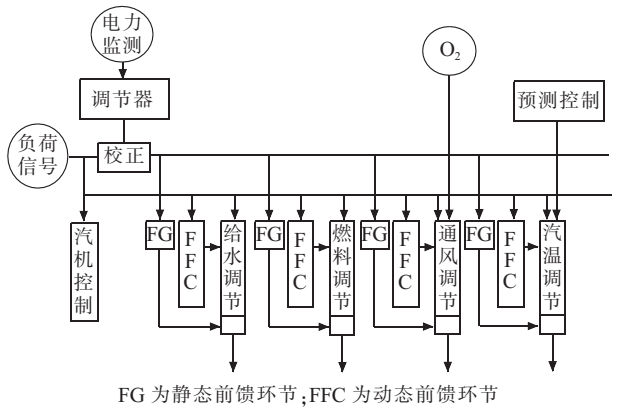


图 2 CCS 策略

控制微过热蒸汽焓值。由于微过热汽温直观,微过热蒸汽焓值线性度好、灵敏度高。

超超临界机组蓄热能力小、参数间相互影响严重,因此机组在运行工况变化时,主要参数稳定性差,难于控制。但是另一方面,机组蓄热能力小,锅炉燃烧率变化时主汽压或机组功率动态响应的惯性大大减小,只要系统的控制策略设计得当、机组主要控制量间静态和动态匹配恰当,在快速的燃烧率控制作用下,主汽压和机组功率动态响应性会更好,主要参数的动、静态调节品质会明显改善,能满足连续滑压运行的要求^[1]。超超临界机组直流炉由于没有汽包的工质缓冲和蓄热缓冲,燃烧率与给水量间的平衡实际上直接代表了锅炉吸热量与汽机耗汽量之间的热量平衡^[2]。在变负荷过程中,只要通过给水量和燃烧率的静态和动态匹配保证热量平衡关系,中间点的过热度或比焓将始终保持平稳,机炉将会处于协调平稳的受控状态。因此,为了保持动静态过程中各控制量间的基本匹配和平衡,加快变负荷过程中相应回路的响应,该设计采用了变增益和非线性环节改善控制特性。

考虑锅炉实际运行中燃用煤种变化多样,多数不能达到设计煤种的运行要求,目前掺烧褐煤的比

例已超过 50%,因此,该系统设计中采用了煤量校正(BTU)修正,其控制方案如下:采用当前运行的功煤比,即机组稳定运行(实际负荷和主蒸汽压力波动很小,且持续 20 min)时的总燃料量和实际负荷之比值,代表了当前煤质的作功能力,经 $F(x)$ 和惯性环节处理,乘以负荷指令,作为燃料量指令前馈。再根据燃料实际情况,估计当前负荷指令下所需要的燃料量指令。

根据功煤比的比值自动适应调整锅炉主控制器调节器比例增益,以增强协调控制系统抗煤质扰动能力。自动适应调整锅炉主控制器调节器比例增益只施加在锅炉主控制器上。

该工程中,对于再热汽温的控制方案采用了新设计的控制方案,满足了控制系统的要求,其控制方案如图 3 所示。图中:M/A 为手/自动切换;PV 为过程变量;SP 为给定值;TR 为温度反馈信号。火检失去 2 个时,燃烧器摆角调节投手动,小风门投手动。当摆动燃烧器处于手动控制状态时,上述逻辑关系解除,当锅炉出现 MET、汽轮机跳闸时,喷水调节阀自动联锁关闭。

3.2 RB 控制方案

RB 逻辑共设计 7 种异常工况,即单台磨煤机跳闸、2 台磨煤机跳闸、单台送风机跳闸、单台引风机跳闸、单台一次风机跳闸、单台空预器跳闸、单台

汽动给水泵跳闸情况下的机组出力限制及处理。当多台辅机跳闸时,以锅炉出力下降最大的 RB 工况为机组 RB 实施工况。当 RB 发生时,机组从自动发电控制(AGC)或 CCS 控制方式切换到汽轮机跟随(TF)方式运行,数字电液调节系统(DEH)切为初压方式进行机调压控制,机前压力定值回路根据不同 RB 工况,确定主汽压力控制的目标值和压力衰减率(压力定值基本参照目标负荷对应的滑压值)。

RB 发生时,锅炉煤量调节器指令以不同 RB 工况降至机组最大限制负荷所对应的目标煤量。由于机组锅炉通常存在较大的热惯性,按常规设计自动控制减煤,锅炉热负荷短时间内下降不足,因此改原有自动调节为动静结合控制,动态时快速跳磨,静态后转为自动控制,稳定煤量至目标负荷所对应的燃料量。跳磨按照 A→F→E 的顺序进行,间隔时间通常为 10 s,保留 3 台磨煤机,其中一次风机 RB 时考虑到风压瞬间下降过快,适当缩短跳磨间隔(为 7 s)。整个 RB 过程中分离器出口温度、炉膛负压、风压等子系统维持自动调节状态,以控制机组主要参数在一定范围内波动。如果仅仅根据动态偏差控制,由于受调节器速度的限制,执行机构来不及动作,直接引发运行工况的恶化乃至机组跳闸,所以送风机、引风机、一次风机等采用了必要的超驰控制和前馈控制。RB 发生时压力定值首先跟踪实际压力,然后

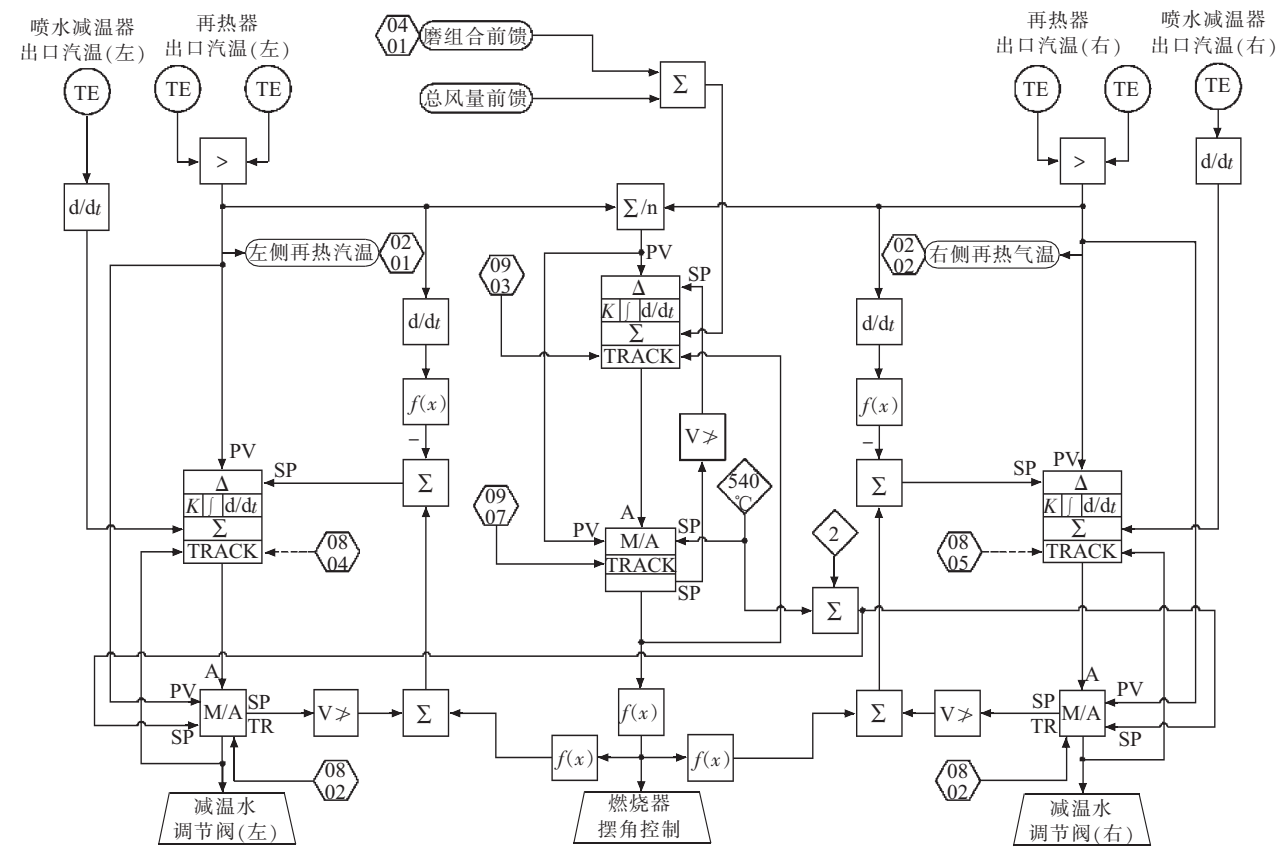


图 3 联动逻辑图

压力定值再按要求变化,以防止 RB 发生时实际压力偏高于设定值导致调门反而打开,引起汽温下降过大。快速投运油枪为紧急投油,随跳磨间隔投入底层相应两层运行磨的油枪(不考虑 A 层油枪),先进油枪,再开油阀,以加强燃烧的稳定。同时考虑到一次风压可能瞬间跌至很低,导致一次风量低跳闸磨煤机,因此将每台磨煤机在一次风机 RB 工况下,一次风量低跳磨延时由 10 s 自动调整为 60 s。RB 发生时,所有减温水调门先超弛关闭 30 s,再释放为正常调节。

AGC、一次调频以及一次调频在线监测功能于机组 168 h 试运行期间进行了测试,调节品质均达到国家行业标准,协调控制范围下限达到 60 MW,上限达到了 1 023 MW,调节速率为 20 MW/min,一次调频频率的偏差控制死区为:±2 r/min,转速的不等率满足 5%,一次调频控制的限幅±3%额定经济出力。

4 结束语

EDPF-NT 在国电谏壁发电厂 1 000 MW 机组

中成功应用至今,未发生任何由于设备原因造成的机组停运,其硬件设备的安全性较好,系统操作系统为 Microsoft windows XP 操作系统,具有兼用性和通用性,修改简单、方便,但是就其软件应用还有较多需要改进的地方,特别是在真正实现在线修改、下载等方面需要进一步研发。

参考文献:

[1] 刘维.超(超)临界机组控制方法与应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
[2] 广东电网公司电力科学研究院编.热工自动化[M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

柳 倩(1967),女,江苏镇江人,工程师,从事火电厂热工自动化控制工作;
裴玉良(1964),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事火电厂热工自动化控制工作;
任志平(1963),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事火电厂设备性能研究分析工作;
刘桂生(1972),男,江苏泰州人,高级工程师,从事火电厂运行管理工作。

Application of EDPF-NT Decentralized Control System in One 1 000 MW Power Plant

LIU Qian, PEI Yu-liang, REN Zhi-ping, LIU Gui-sheng
(Guodian Jianbi Power Generation Company, Zhenjiang 212006, China)

Abstract: The structure features of the EDPF-NT decentralized control system (DCS) are outlined in the paper, and the existing advantages and disadvantages as well as the basic net arrangement of the system applied in Guodian Jianbi Power Generation Company are also presented. Further, the first successful application of the domestic DCS in one 1 000 MW coal-fired power plant is emphatically introduced. By using this system, the field operators can not only achieve the centralized control of the boiler, steam turbine and electric generator, but also finish a series of important operations including inspection, control, alert, interlock protection, diagnosis, unit start up and shut down, accident disposal and the operating guidance.

Key words: EDPF-NT; control system; application

下 期 要 目

- 苏沪杭电动汽车充换电服务网络城际互联方案和工程难点
- 江苏低频低压减载与负荷联切协调配置研究
- 电快速瞬变 / 脉冲群抗扰度试验及对策
- 常规站智能化改造中的母线保护方案研究
- 智能变电站信息集成及二次安全防护方案
- 一种改善距离保护动作特性的方法及其应用
- 断路器跳闸脉冲监测系统的研制与应用
- 一种基于 RTDS 的消弧选线装置的试验研究
- 某 660 MW 超超临界机组凝结水精处理系统运行技术

某亚临界锅炉墙式辐射再热器技术改造

唐 勇¹, 李嘉康¹, 潘 丰¹, 季益冰²

(1. 河北大唐国际张家口热电有限责任公司, 河北 张家口 075000;

2. 江苏骏辰能源科技有限公司, 江苏 张家港 215627)

摘 要:针对 2 台 300 MW 锅炉再热汽温低、屏式过热器壁温报警和过热器减温水量大的问题, 分析了产生原因, 提出了墙式辐射再热器改造方案, 并进行了燃烧调整试验, 改造后的实际运行数据表明, 过热器壁温和减温水量得到改善, 提高了再热器汽温。为同类型锅炉技术改造提供可借鉴经验。

关键词:墙式辐射再热器; 安全性; 经济性; 锅炉改造

中图分类号: TK233.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2012)03-0073-03

某热电厂有 2 台亚临界 HG-1025/17.5-YM33 锅炉, 机组分别于 2009 年 11、12 月投产运行。锅炉设计为一次中间再热、自然循环汽包炉, 采用单炉膛平衡通风、四角切圆燃烧方式, 设计燃料河北烟煤。锅炉以最大连续负荷为设计参数, 最大电负荷为 333 MW; 机组额定电负荷为 300 MW 时锅炉的额定蒸发量为 960 t/h; 再热蒸汽进口压力 3.42 MPa, 出口 3.58 MPa; 再热器温度出口 541 ℃, 进口 324 ℃; 给水温度为 275.4 ℃。该锅炉自投运以来, 存在再热蒸汽欠温、屏式过热器壁温度超温和过热器减温水量大等问题, 影响机组安全性和经济性。

1 锅炉投运后出现的问题

(1) 再热器蒸汽欠温。在运行燃烧调整时, 为提高再热器蒸汽温度, 向上摆动燃烧器喷嘴时还会发生后屏过热器金属壁温超温, 容易爆管, 严重威胁机组安全; 由于后屏过热器金属壁温的限制给燃烧调整带来很大的局限性, 为保证后屏过热器不超温, 只有降低摆动火嘴角度, 在 150 MW 低负荷情况下再热蒸汽欠温可达 30 ℃以上, 分析是锅炉再热器吸热量不足导致。因此, 必须调整再热器受热面, 使高温烟气热量尽量被有效利用, 降低后屏升温压力和排烟温度。

(2) 再热器两侧温度偏差大。2 台炉再热器蒸汽温度两侧偏差都大, 最高可达 30 ℃, 可能是热量分布吸收不均匀所致。究竟是管路堵塞造成流量下降影响局部传热效果, 还是计算误差导致分布热量偏差, 需要重新核算。

(3) 过热器减温水量大, 煤耗增加。某日 4 个运行班锅炉减温水量为 35.6~57.5 t/h, 2 台锅炉实际减温水量高出设计值 20~37 t, 将增大发电煤耗。再热器减温水量对经济性的影响可按以下方法简

单计算: 300 MW 机组每 100 t/h 再热器减温水增加 5 g/(kW·h) 的发电煤耗, 上述减温水量约增加 1.5~2.5 g/(kW·h) 的发电煤耗, 单台机按年运行 6 000 h、250 MW 负荷计算, 共增加标煤消耗 3 000 t。锅炉改造前某一时刻实际有关运行参数如表 1 所示, 300 MW 负荷下再热器出口温度比设计值低 6.7 ℃。

2 墙式辐射再热器改造方案

针对以上问题, 作者对锅炉整体受热面结构进行了校核计算^[1], 发现再热器系统的受热面积偏小, 采用增加墙式辐射再热器的换热面积试图改善再热汽欠温的问题。该型锅炉的再热器系统分为 3 个部分: 墙式辐射再热器、后屏再热器和末级再热器。墙式辐射再热器布置在水冷壁前墙和水冷壁侧墙靠近前墙的部分, 受热面高度为 18.959 m, 其最下端在分隔屏下 3.353 m。前墙辐射再热器有 224 根 D50 mm 管子, 两侧墙辐射再热器共有 196 根 D50 mm 管子, 以节距 50.8 mm 沿水冷壁表面密排而成。后屏再热器位于后屏过热器和水冷壁悬吊管之间, 一共 30 屏, 管径 D63 mm, 以 457.2 mm 横向节距沿宽度方向布置。末级再热器位于水平烟道内, 在水冷壁后墙悬吊管和水冷壁排管之间, 一共有 60 屏, 管径为 D63 mm, 以 228.6 mm 横向节距沿炉宽方向布置。

锅炉再热器技术改造根据文献[2]从墙式辐射再热器入手。墙式辐射再热器采用 D51×4 的 12Cr1MoVG 管子, 总计 420 根。为了简化施工, 降低改造成本, 该次改造中采用受热面管件探入炉膛内的结构形式, 将墙式辐射再热器受热面过渡连接的管子切除一部分, 用新制作的 U 型弯管件连接完成过渡(如图 1 所示)。如果采用辐射再热器入口集箱向下方移动, 并以此方式延伸辐射再热器管的方法会增大施工量并涉及到再热器管道的重新布置, 造成施工难度和工作量增大。入口集箱的管座(D63×

表 1 锅炉改造前某一时刻实际运行参数

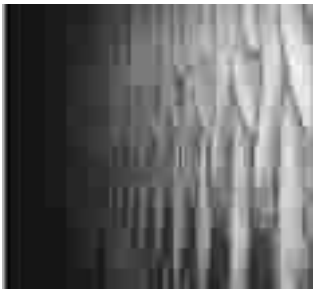
序号	项目	负荷 1	负荷 2	负荷 3	负荷 4
1	电负荷 /MW	156.7	208.1	250.6	299.0
2	主蒸汽流量 /(t·h ⁻¹)	486	635	783	946
3	给水流量 /(t·h ⁻¹)	530	678	819	1 009
4	汽包压力 /MPa	13.62	15.91	17.35	18.28
5	主蒸汽压力 /MPa	13.06	15.10	16.28	16.80
6	主蒸汽出口温度 /℃	549.6/539.8 平均 544.7	541.6/535.9 平均 538.8	542.1/533.0 平均 537.6	542.4/535.3 平均 539.0
7	再热蒸汽出口温度 /℃	497.8/519.4 平均 508.6	520.5/536.1 平均 528.3	522.9/545.0 平均 534.0	528.0/540.6 平均 534.3
8	一减前蒸汽温度 /℃	423.9/410.2	411.8/400.2	409.9/402.9	399.6/397.7
9	一减后蒸汽温度 /℃	348.7/350.3	359.2/387.0	369.2/383.0	383.8/394.4
10	二减前蒸汽温度 /℃	547.1/524.7	520.6/519.2	510.5/508.7	528.2/509.9
11	二减后蒸汽温度 /℃	502.4/519.0	516.1/518.9	502.6/500.7	503.5/505.6
12	一级减温水流量 /(t·h ⁻¹)	26.1/21.2	34.7/7.7	34.7/17.3	18.2/3.2
13	二级减温水流量 /(t·h ⁻¹)	8.3/1.9	1.2/2.6	1.9/0	11.6/2.6
14	减温水总量 /(t·h ⁻¹)	57.5	46.2	53.9	35.6
15	燃料量 /(t·h ⁻¹)	95	116	139	176
16	预热器入口烟温 /℃	324.4/321.9	335.7/332.8	350.5/345.5	356.0/352.4
17	预热器出口烟温 /℃	119.0/122.6	124.4/130.0	121.7/126.0	121.3/130.5
18	后屏过热器壁温 /℃	575.0	570.0	565.0	530.0

4.5, 材质 20G) 与炉内 U 型管件 (D51×4.5, 12Cr1MoVG) 焊接需要经过一个异径接头, 该异径接头与炉内的 U 型管件在出厂前完成焊接工作, 施工时每根管件只需焊接两道焊口。改造后墙式辐射再热器部位的水冷壁管件尺寸、形状也需要改变, 重新设计并更换锅炉前侧及左、右侧水冷壁异型管件 142 根。所有新增焊口均进行 100% 射线检验。

施工中墙式辐射再热器入口集箱的位置及其他附属结构不发生变动, 原设计中安装的保温、密封及化妆板, 改造后全部从新恢复。

3 改造后锅炉燃烧调整试验

2 号机组大修投运后, 华北电科院对其进行燃烧调整试验。墙式辐射再热器改造完成后炉内的燃烧工况有非常好的改进效果, 改造后的实际运行



(a) 改造前



(b) 改造后

图 1 墙式辐射再热器的改造

数据表明, 屏过金属壁温和过热器的减温水量均得到较好的改善, 有效提高了再热器汽温(如表 2 和表 3 所示)。试验期间未掺烧褐煤, 全部采用河北蔚县烟煤, 其煤质为: 全水分 18.6%, 灰分 26.38%, 挥发份 27.36%, 固定碳 41.99%, 低位发热量 16.8 7 MJ。采用正塔型的配风方式以强化炉内燃烧, 以增加新增墙式辐射再热器受热面的吸热能力。

表 2 2011 年 7 月 5-6 日平均入炉煤主要参数

项目	2:00~8:00	8:00~14:00	14:00~20:00	20:00~2:00	日平均值
全水分 /%	17.0	18.2	22.4	15.8	18.6
灰分 /%	26.47	22.90	26.89	30.36	26.38
挥发分 /%	25.50	28.48	28.08	26.34	27.36
固定碳 /%	44.02	43.82	40.53	39.82	41.99
低位发热量 / (MJ·kg ⁻¹)	17.43	17.82	15.70	16.58	16.87

(1) 低负荷下再热器温度同比提高。150 MW 负荷下, 通过配风调整再热汽温提高到 530.0℃, 相比原来提高 12℃; 200 MW 负荷下, 再热汽温提高到 535.0℃, 相比提高 7℃。上述再热汽温的运行条件为: 屏过出口过热器壁温不超过 570.0℃, 氧量比正常配风低 0.5%, 再热器汽温上下有波动, 但可持续, NO_x 排放浓度基本不变。

(2) 一、二次风温升比改造前提高。从表 3 炉烟温度和空预器温度看, 2 号炉空预器入口烟温比未改造前略低, 墙式辐射再热器面积增加后炉膛吸热增加, 对炉后的烟温略有影响。空预器检修时进行了水冲洗, 受热面干净, 堵塞减少, 烟气的差压也小, 所以一、二次风的温升 2 号炉均大于 1 号炉, 锅炉热效

表 3 空气预热器入和出口烟气温度等参数对比

项目	1 号炉(未改造)	2 号炉(改造后)
负荷 /MW	296.9	300.9
空气预热器入口烟温 /℃	360.0,364.0/ 360.0,355.0 平均 359.8	356.0,359.0/ 352.0,359.0 平均 356.5
空气预热器出口烟温 /℃	139.0,144.0/ 127.0,131.0 平均 135.2	141.0,131.0/ 140.0,129.0 平均 135.2
预热器烟气侧压差 /kPa	1.09/1.25	0.67/-
一次风量 /(t·h ⁻¹)	286	294.3
二次风量 /(t·h ⁻¹)	646	723.5
一次风入口温度 /℃	38.6/37.8	40.4/38.5
一次风出口温度 /℃	322.7/317.0	331.7/319.8
一次风温升 /℃	282.0	286.0
二次风入口温度 /℃	28.9/30.8	31.5/28.0
二次风出口温度 /℃	329.9/322.0	335.7/338.0
二次风温升 /℃	296.0	307.0
煤量 /(t·h ⁻¹)	159	151

率高于 1 号炉。对 2 号炉而言,1 号炉负荷低 1%,煤量高 5.3%。300 MW 负荷下,2 号炉一次风温升提高了 4.0℃;空预器进口温度 2 号炉比 1 号炉还低约 3℃,但 2 号炉二次风温升比 1 号炉高多 11℃。

(3) 金属壁最高温度和再热器两侧温差下降。300 MW 电负荷下,2 号炉屏过最高壁温 518.1℃,较改造前最高壁温 1 号炉 556.8℃下降了 38℃。150 MW 负荷下,2 台炉燃烧器摆角保持在 16%时,2 号炉左右侧再热器出口温差降低了 10℃。改造前,左侧 481.9℃,右侧 502.6℃,平均为 492.3℃;改造后,左侧 494.4℃,右侧 509.8℃平均为 502.1℃,通过配风调整再热汽温可以提高到 530.0℃。

(4) 改造后过热器的减温水量变化如表 4 所示,在负荷基本相同下,同时间相比,过热蒸汽减温水总量,2 号炉明显降低了 19 t/h。

表 4 改造后过热器的减温水量变化(同一时刻)

项目	1 号炉(未改造)	2 号炉(改造后)
负荷 /MW	296.9	300.8
主汽温度 /℃	539.5/538.9 平均 539.2	537.6/528.4 平均 533.0
主汽压力 /MPa	16.79	16.41
主汽流量 /(t·h ⁻¹)	918.7	940.9
一级减温水量 /(t·h ⁻¹)	22.7/5.4	19.1/0
二级减温水量 /(t·h ⁻¹)	7.0/8.8	5.7/0
过热器减水总量 /(t·h ⁻¹)	43.8	24.8

4 结束语

某热电公司 2 号锅炉墙式辐射再热器的改造和运行方式优化调整,在保证后屏过热器金属壁温不超过 570.0℃的条件下,再热蒸汽出口温度可达到 530.0~540.0℃,较改造前提高 20℃,供电煤耗降低 1.6g/(kW·h),年节省标煤 3 000 t 左右,标煤按 620 元/t,每年可节省 186 万元;同时也减少了汽轮机因再热汽过热度不够而产生的末级叶片冲蚀的危险,可供同类机组再热器改造参考。

参考文献:

[1] 前苏联全苏热工研究所(BTN),中央锅炉透平研究所(UKTH).锅炉机组热力计算一标准方法[M].北京:机械工业出版社,1978.
[2] 陈听宽.锅炉原理[M].北京:机械工业出版社,1979.

作者简介:

唐 勇(1970),男,吉林人,副总经理,从事电厂生产管理工作;
李嘉康(1987),男,河北张家口人,助理工程师,从事电厂设备生产管理工作;
潘 丰(1971),男,河张家口人,助理工程师,从事热电厂设备管理工作;
季益冰(1986),男,江苏张家港人,助理工程师,从事电站和工业锅炉设计制造工作。

Technical Reform of the Wall-type Radiation Reheater Installed in One Subcritical Boiler

TANG Yong¹, LI Jia-kang¹, PAN Feng¹, JI Yi-bing²

(1. Datang Zhangjiakou Thermal Power Generation Co.Ltd., Zhangjiakou 075000, China;

2.Junchen Energy Technology Co.Ltd., Zhangjiagang 215627, China)

Abstract: Focusing on the low reheat steam temperature, overheating of platen superheater tube wall as well as the overlarge consumption of attemperation water, this paper fistly analyze the root causes, and then propose a reform scheme for the radiation reheater. In addition, combustion adjustment experiment has also been implemented. The field operation data obtained after reform indicate that the reheat steam temperature has increased and the issues associated with superheater tube wall temperature and attemperation water have also been mitigated. This work can provide valuable reference for the reform of similar boilers.

Key words: wall-type radiation reheater; safety; economy; boiler reform

某 300 MW 机组给水加氨控制系统失调原因分析及对策

陈宝义,包春雨,俞秀生
(淮北国安电力有限公司,安徽 淮北 235106)

摘 要:以某 300 MW 机组锅炉给水加氨自动控制系统为例,介绍了该控制系统的基本组成和工作原理,分析了引起给水加氨控制系统失调的主要原因,并采取变增益三区段非线性 PID 和积分模糊控制(IFC)算法,利用 PLC 进行编程控制,实践证明取得了较好的应用效果。

关键词:给水加氨;自动控制;原因分析;模糊控制

中图分类号:TK223.7

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0076-03

锅炉给水 pH 是火力发电厂水汽监督指标中最为重要的一项,其合格与否,也是决定整个热力系统能否安全运行的关键环节之一。目前,大多数电厂加药自动控制系统都不能正常投用,仅凭手工调节加氨量来实现给水 pH 的调节,严重影响机组的安全运行和企业自动化水平的提高。这就对从事加药自动控制系统维护人员提出了一个新问题,即如何能让加药自动控制系统得以切实投用,充分发挥自动调节系统的潜能,保证电厂中热力系统的安全运行,使企业的投资得到应有的回报。以某 300 MW 机组的锅炉给水加氨自动控制系统为背景,将该系统的部分硬件和软件进行了改造和调整,以期实现加药自动控制系统的正常投运。

1 给水加氨控制系统的组成及工作原理

通过对给水加氨,可以消除热力系统中的 CO_2 ,提高给水 pH,防止热力系统酸性腐蚀。经验证明^[1],一般给水 pH 调节到 8.5~9.2 为宜,对应含氨量应在 1.0~2.0 mg/L 以下。

在一定温度下 pH 与氨的含量,以及氨的含量与水的电导率之间存在对应关系^[2],因此,可以用检测电导率的方法间接测定氨的含量。

给水加氨自动控制系统的组成如图 1 所示。

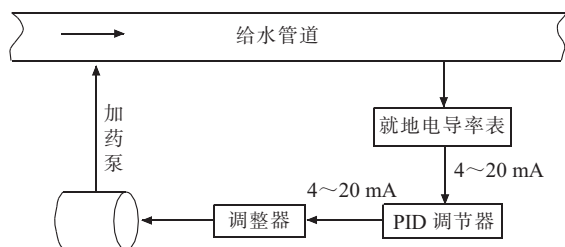


图 1 给水加氨自动控制系统的组成

在自动调节系统中,就地电导率仪表间接测量出系统管道中氨的含量,并输出对应氨含量的 4~20 mA 电流信号进入 PID 调节器,比较运算后再输

出 4~20 mA 指令电流信号至加药泵的行程调节机构或变频器,从而改变加药泵的行程或变频器的输出频率,以达到调节加氨量、控制给水 pH 的目的。调整器目前主要分为行程调节和变频调节二种,一般根据各厂的实际情况进行选择。

2 给水加氨控制系统的现状及原因分析

2.1 系统现状

该 300 MW 机组的给水加氨自动控制系统于 2000 年开始投入运行。运行中频繁出现 pH 失调现象,现场维护人员反复进行处理和调整都不能有效解决,一度终止运行,改为人工手动调节。经现场调查发现,主要存在以下 2 个现象:一是就地电导率仪表的测量值变化幅度大,远超出相应水质 pH 的变化幅度,且毫无规律可循。二是 PID 调节器出现超调或失调,造成给水 pH 频繁超出控制范围,反复修改 PID 参数均无效。

2.2 原因分析

2.2.1 加氨和取样装置不规范

现场检查发现,造成电导率仪表测量值不规则波动的原因是加氨和取样装置不规范,主要是给水管道内的加氨和取样管没有均布装置,造成加氨出现偏流,取样没有代表性,采集到的实际样品浓度变化无规律,随机性较大。通过现场加装均布装置,这一问题得到了解决。规范的加氨和取样装置如图 2 所示。

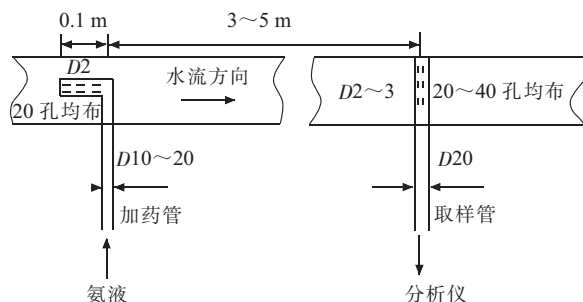


图 2 加氨管和取样管安装示意图

2.2.2 系统反应严重滞后

给水 pH 值的控制过程是典型的非线性控制过程,加之主控过程涉及长距离的液体传输和反应器中化学反应包含长时间的潜伏期,导致系统具有严重的时滞性。对于 pH 的调节,国内外多采用传统的 PID 算法,但由于反应过程中,中和点附近的高增益使得传统的 PID 控制器的参数调整非常困难,因为控制器只能采用很小的比例增益,否则系统不稳定,而比例增益过小,又使系统的动态特性变坏。这是热力系统安装位置及化学反应特性所造成,要想实现 PID 的有效调节,必须采用其他辅助方法加以克服。

3 几种 pH 值控制方法

3.1 常规 PID 控制

按偏差的比例、积分和微分线性组合进行控制的方式,就是 PID 控制^[3]。一个常规的 PID 控制系统如图 3 所示,其中 r 为参考输入信号, PID 表示控制器, P 为被控对象模型, d 为干扰量, $e(k)$ 为系统误差, $u(k)$ 为控制量, $pH(k)$ 为被控过程输出量。

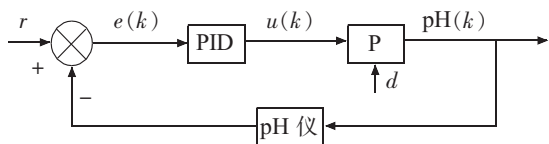


图 3 典型 pH 值控制系统

可见,常规 PID 控制中的比例作用实际上是一种线性放大或缩小作用,很难适应加氨过程中被控对象非线性的特点。

3.2 变增益三区段非线性 PID 控制

将 pH 值变化过程按照拐点分为 3 个区段,1 个高增益区,2 个增益系数不同的低增益区,高增益区控制器采用较低的增益,在不同的低增益区控制器采用不同的高增益,以满足系统期望的性能指标要求。此外,为防止积分饱和采用带死区的 PID 控制算法和带输出限幅的 PID 控制算法。

3.2.1 带死区的 PID 控制

采用常规的 PID 控制易产生积分饱和现象,使控制量过大。而采用带死区的 PID 控制,则会降低计量泵的调节量频繁变化,减小 pH 值的波动。当误差较小时,即进入死区后,调节器的输出为积分器在此以前的内容,实际上这时的闭环调节作用已经消失,控制输出不会发生变化。误差较大时恢复其控制作用。

3.2.2 带输出限幅的 PID 控制

由于长期存在偏差或偏差较大时,计算的控制量有可能出现饱和而溢出。如果执行机构已达到极限位置仍然不能消除偏差时,由于积分的作用,控制

量继续增大或减小,而执行机构已无相应的动作。当出现积分饱和时,势必使超调量增加,控制品质变坏。作为防止积分饱和的办法之一,就是对控制量限幅,同时停止积分作用。

3.3 模糊控制 IFC 算法

模糊控制的基本原理如图 4 所示,它的核心部分是模糊控制器,如图中虚线框中部分所示。模糊控制器的控制规律由计算机的程序实现。控制算法可概括为以下 4 个步骤:(1) 根据本次采样得到的系统输出值,计算出输入变量;(2) 将输入变量的精确量变为模糊量;(3) 根据输入变量(模糊量)及模糊控制规则,按模糊推理合成规则计算控制量(模糊量);(4) 由上述得到的控制量(模糊量)计算精确的控制量。

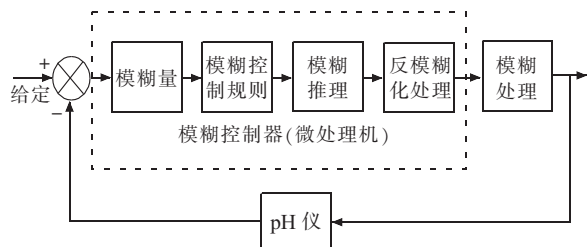


图 4 模糊控制原理

4 对策实施

4.1 利用 IFC 算法进行数据采集滤波处理

该控制系统中滤波程序的基本原理为:在周期时间内连续取 5 个采样值,并求出其平均值 $\bar{X}$:

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) / 5 \quad (1)$$

采集当前值,并求出差值 $\Delta = X_i - \bar{X}$ (采集值与平均值的差)。

若 Δ 的绝对值 > 0.2 ,则舍弃 X_i ,取 $\bar{X} = 0.2$ 为根据实际情况设定的信号波动的范围值;若 Δ 的绝对值 ≤ 0.2 ,则即 X_1 出栈, X_2 替换 X_1 , X_3 替换 X_2 ,依次递推,用当前采样的 X_6 替换 X_5 ,然后用这 5 个新的数值,再进行比较。如此周而复始的执行这段程序就可以实现滤波的功能。

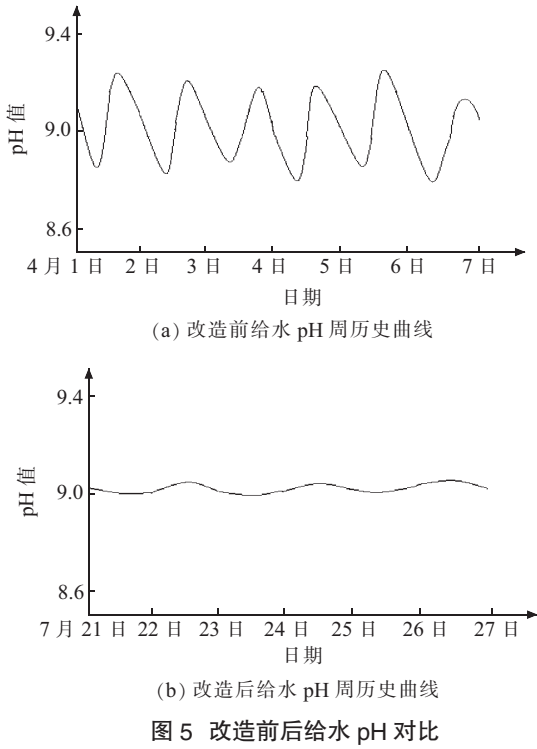
4.2 根据实际情况修改 PLC 控制程序

利用 PLC 强大的编程和控制功能^[4],将滤波后的 pH 值变化过程按照拐点分为 3 个区段,1 个高增益区,2 个增益系数不同的低增益区(根据所控制的 pH 最佳给定值,结合系统加氨与取样点的安装位置、管道长短等因素综合选取),编写条件控制程序,在高增益区控制器采用较低的增益,在不同的低增益区控制器采用不同的高增益,并设置 PID 的死区和输出限幅条件,从而满足系统期望的性能指标,输出合适的控制信号(对应变频器的频率)至现场交流

变频器,进而控制加氨泵电机的转速,达到稳定调节系统 pH 的目的。

6 运行情况

该 300 MW 机组给水加氨自动控制系统改造前后给水 pH 的周历史曲线如图 5 所示。



改造后的给水加氨自动控制系统自 2010 年 7 月份投入运行以来,给水 pH 基本能维持在 9.0~9.1 之间,完全达到控制要求。

5 结束语

实践证明,基于可编程序控制器的给水加氨自动控制系统,可通过灵活的编程手段,满足加氨系统的自动调节,达到很好的效果,从而解决了加氨自动系统极易失调以及手动控制难以保证水质指标稳定的困难,减轻了运行人员的工作强度,提高了设备自动化水平。

参考文献:

[1] 初立杰.电厂化学[M].北京:中国电力出版社,2006.
[2] 薛凤莲.自动加氨技术的研究与合同应用[J].东北电力技术,2004(8):27-29.
[3] 金以慧.过程控制技术[M].北京:清华大学出版社,1993.
[4] 刘志远.可编程序控制器原理及在电厂中的应用[M].北京:中国电力出版社,1999.

作者简介:

陈宝义(1962),男,安徽淮北人,工程师,从事电厂生产、技术管理工作;
包春雨(1971),男,安徽淮北人,工程师,从事电厂热控技术管理工作;
俞秀生(1971),男,安徽淮北人,工程师,从事电厂程控仪表维护工作。

Analysis and Solution for Failure of Feed Water Adding Ammonia Control System of 300 MW Power Plant

CHEN Bao-yi, BAO Chun-yu, YU Xiu-sheng

(Huaibei Guoan Electric Power Co.Ltd., Huaibei 235106, China)

Abstract: Serving as an example, the feed water adding ammonia control system in one 300 MW power plant is analyzed in this paper. The system constitution as well as the operation principle of this control system is introduced. Having analyzed the main causes, PLC control strategy employing variable-gain three regions nonlinear PID and IFC algorithm is utilized, and better field application effects are achieved.

Key words: feed water adding ammonia; automatic control; cause analysis; fuzzy control

核电厂的组成

核电厂由核岛(主要是核蒸汽供应系统)、常规岛(主要是汽轮发电机组)和电厂配套设施(BOP)三大部分组成。

以压水堆核电厂为例,核燃料被放置在反应堆压力容器内。当发生链式反应时,一次冷却剂流经压力容器被燃料组件加热,通过一回路管道进入蒸汽发生器,使其二次侧的水变成蒸汽,驱动汽轮发电机组发电。一次冷却剂然后经冷却剂泵打回压力容器,成为一个封闭回路,即一回路。

在蒸汽发生器二次侧生成的蒸汽经核汽轮机做功后,在主凝汽器内被冷凝成水,经逐级加热并由给水泵送回蒸汽发生器,形成另一封闭回路,成为二回路。

主凝汽器所需的循环冷却水,由泵房提供。核电厂的汽轮机所需的冷却水量较常规火电厂大,所以大都建在海边或大江、大河的岸边。一般核电厂的冷却水流过凝汽器后直接排回水域(一次通过方式)。

反应堆厂房(即安全壳)是密封的。核电厂所有带有强放射性的关键设备都安装在此厂房内。在发生核电厂严重事故时(如主管道破裂事故)可以将泄露出来的放射性物质包容在厂房内。

某 300 MW 水氢氢机组定冷水含氢量超标分析及处理

史松梅,范朝光,顾孟祥,曾云峰,刘 波
(太仓港协鑫发电有限公司,江苏 苏州 215433)

摘 要:针对太仓港协鑫发电有限公司 4 号机发电机组定冷水含氢量超标问题,根据系统构成和现场检查结果分析了产生的原因,制定了合理的处理方案,确保定冷水含氢量在允许范围内,并提出了防止此类问题再发生的预防措施。

关键词:水氢氢机组;定冷水含氢量;分析处理;预防措施

中图分类号:TM621.7文献标志码:B文章编号:1009-0665(2012)03-0079-02

太仓港协鑫发电有限公司 4 号机为上海电机厂生产的 QFSN-300-2 型发电机组,冷却方式为水-氢-氢冷,即定子线圈及连接线、出线套管采用水内冷,转子绕组、定子铁心及端部均采用氢冷氢气由装在转子两端的风扇强制循环,并通过设置在定子机座上部的 4 组氢气冷却器进行冷却,氢气系统由发电机定子外壳、端盖、氢气冷却器、密封瓦以及氢气管路构成全封闭气密结构。重点介绍太仓港协鑫发电有限公司 4 号发电机定冷水含氢量超标的原因分析及处理过程,同时提出了解决问题的预防措施,以提高机组安全运行水平。

1 定冷水含氢量超标分析

2011 年 7 月 21 日 10:05,运行人员发现 4 号发电机定冷水箱顶部放空气门上部 5 cm 处含氢量达 4.2%(报警值为 3.2%)未报警,检查发现发电机定冷水箱至漏氢报警仪一次门未全开,将发电机定冷水箱至漏氢报警仪一次门全开,发“发电机定冷水箱漏氢”报警信号,其他未发现异常。经查 4 号机每天补氢量呈上升趋势,由平时的 8 m³/d 上升至 22

m³/d。可以初步判断,发电机氢冷系统氢气漏入发电机定冷水系统(如图 1 所示)。氢冷发电机的漏氢部位归纳起来有两部分:一是氢冷发电机本体结构部件的漏氢,二是发电机外部附属系统的漏氢。氢冷发电机本体结构部件的漏氢涉及 4 个系统:水电连接管和发电机线棒的水内冷系统,发电机密封瓦及氢侧回油管接头的油系统,发电机氢气冷却器的循环水系统,发电机人孔、端盖、手孔、二次测量引出线端口、出线套管法兰及瓷套管内部密封、出线罩、氢冷器法兰、转子导电杆等的氢密封系统。发电机外部附属系统的漏氢包括氢管路阀门及表计、氢油差压调节系统、氢油分离器、氢气干燥装置、氢湿度监测装置、绝缘过热检测装置等。结合 4 号发电机氢气系统的结构,从图 1 可以看出,氢气进入定冷水的最大可能性为水电连接管和发电机线棒的水内冷系统。

2 发现的问题

问题 1。2011 年 9 月 8 日 4 号发电机停机检修,9 月 15 日两侧端盖、导风筒拆除完毕,14:00 进行定子绕组检查性水压试验,发现汽侧第 33 槽绕组

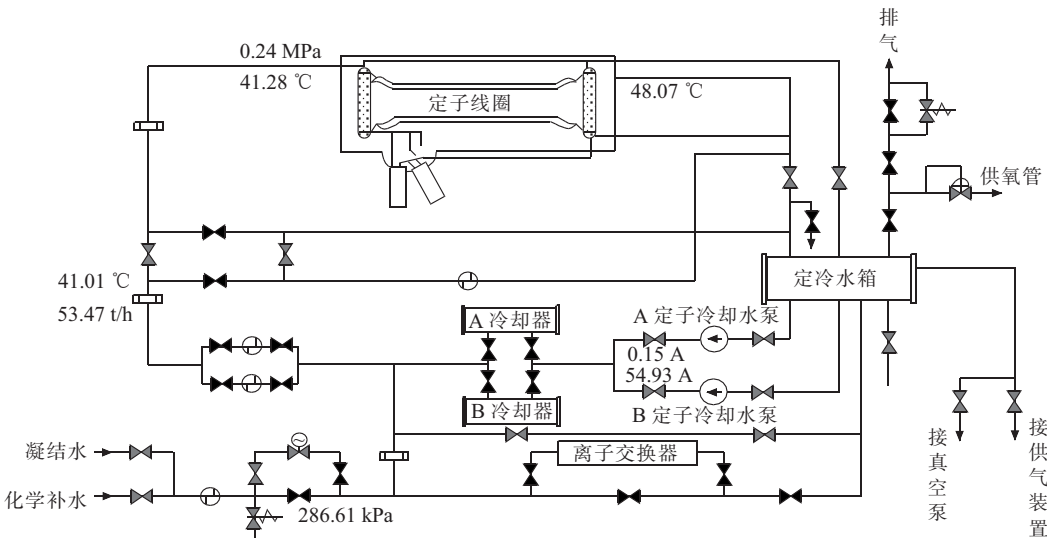


图 1 发电机定子冷却水系统

绝缘引水管三通部位存在渗水,打开手包绝缘检查为三通金属接头存在砂眼(如图2所示)。



图2 漏氢点

问题2。9月17日定冷水系统恢复并进行发电机定冷水回路反冲洗,每天跟踪测量定冷水水质、发电机汇水环对地直流电阻、绕组绝缘电阻数据变化情况,定冷水电导率由起初的 $8.9\text{ }\mu\text{S/cm}$ 下降至 $1.416\text{ }\mu\text{S/cm}$,总汇水环对地直流电阻由 $0.2\text{ k}\Omega$ 上升至 $18\text{ k}\Omega$,绕组绝缘电阻R1为 $1.84\text{ G}\Omega$,R60为 $1.81\text{ G}\Omega$,吸收比接近1,绕组直流泄漏电流试验无法进行。9月23日检查发现发电机汽侧18槽、19槽绝缘引水管内壁存在异物,如图3(a)所示,检查定冷水A、B两侧滤网滤芯上有黑色黏稠状物质(如图4所示),经过化验确定该物质为油、24%铜、1%铁混合物,离子交换器树脂中含黑色物质。

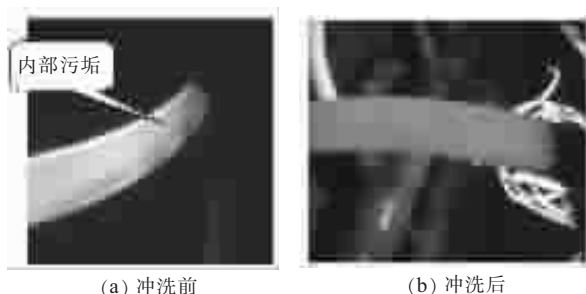


图3 汽侧18槽和19槽绝缘引水管内壁

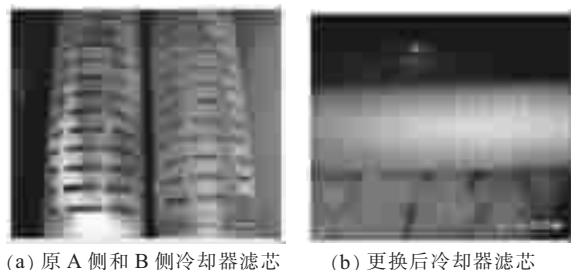


图4 定冷水A侧和B两侧滤网滤芯

3 处理过程

问题1处理过程。2011年9月15日18:00左右,上海电机厂人员将砂眼补焊完毕并重新更换一根绝缘引水管,9月16日14:00开始进行8h修后水压试验,水压试验 0.5 MPa ,8h无泄漏。

问题2处理过程。9月27~29日利用4号机组辅汽加热定冷水至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过循环过滤的方式消除发电机定冷水系统内部杂质。经过4次热水循环冲洗并4次换水,热水循环冲洗共14h,汽侧19槽油污基本消失,汽侧18槽内壁油污面积减小(如图3(b)所示)。停止热水循环后,将发电机热循环水温降温至 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$,正常通水后,超声波测汽侧流量试验合格,汇水管对地电阻 $32.5\text{ k}\Omega$,电导在0.35,绕组绝缘A相 $1\text{ }000\text{ M}/1\text{ }600\text{ M}$,B相 $1\text{ }290\text{ M}/2\text{ }660\text{ M}$,C相 $990\text{ M}/1\text{ }570\text{ M}$ 。

4 预防措施

(1) 建立每台发电机补氢台账,并进行对比分析,发现发电机补氢量异常增大,应及时汇报并组织分析,查找补氢量上升原因。

(2) 保持发电机定冷水箱至漏氢报警仪一次门为全开状态,利用机组检修对漏氢报警仪定值进行校验,确保定冷水箱含氢量超标时能够及时报警。

(3) 发电机检修时,对发电机定冷水回路进行检查性水压试验,及时发现并消除发电机定冷水回路存在的安全隐患。

(4) 建议将发电机定冷水箱上部充氮气^[1],一方面可以隔绝水与空气的接触,减少氧对铜线的腐蚀;另一方面如定子线棒存在漏点,氢气不可避免的漏至定冷水侧,漏氢汇集至定冷水箱,导致定冷水箱顶部空间氢气浓度在爆炸极限范围内,充氮气可以避免爆炸事故的发生。

5 结束语

综上所述,发电机出现漏氢现象后,在停机前积累数据分析和查找漏点,如停机前无法查出漏点,则应在停机后重点对水电连接管和发电机线棒的水内冷系统采用水压试验查找漏点,查出漏点后应设法消除漏点;同时应充分考虑密封油经氢气带入内冷水系统后对发电机定子回路造成的污染及对发电机定子回路绝缘造成的影响,利用机组辅汽加热发电机定冷水系统,采用热水循环冲洗法消除发电机定冷水系统内部杂质的方法,可起到良好的效果。

参考文献:

[1] 国家电力公司发输电运营部. 防止电力生产重大事故的二十五项重点要求[M].北京:中国电力出版社,2001.

作者简介:

史松梅(1968),男,江苏苏州人,高级工程师,从事发电厂电气运行管理工作;

范朝光(1977),男,江苏苏州人,工程师,从事发电厂运行管理工作;

(下转第84页)

微电网关键技术及研究现状

朱永利,姚建国,刘 骥

(国网电力科学研究院,江苏 南京 210003)

摘要:微电网技术能够解决传统分布式发电分散接入、单独并网所带来的整体不受控的问题;当发生电网扰动时,其可有效解决单个分布式电源上关键负荷面临的电能质量问题,同时有利于提升电网可控性。从能量管理、控制策略、继电保护等方面阐述了微电网技术近年来的研究热点及发展趋势,讨论了需要解决的若干关键技术问题,结合相关试点示范工程介绍了国内微电网应用研究现状,展望了微电网技术今后的发展方向。

关键词:微电网;分布式发电;无缝切换;主从控制;对等控制

中图分类号:TM727

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2012)03-0081-04

相对于传统大电网的新概念,微电网是指由多种分布式发电(DG)及负荷按照一定拓扑组成,通过并网开关和主网相连的小型供电网络。其域内多个DG连接的主馈线称为公共连接点(PCC)。当主网发生扰动时,微电网能无缝切换至离网运行从主网脱离。所谓无缝,即对重要敏感负荷的供电不受影响。当主网扰动清除后,微电网又能重新同步并入主网。微电网技术与常规DG的本质区别在于:前者允许并且人为安排离网运行;后者禁止离网(孤岛)运行。此区别是由两者在配网中的不同地位所决定的;前者从其概念提出之际即被当作是一个独立的电力系统,其设计宗旨为与配网互利共生,无缝切换及即插即用;而后者在配网中的地位是负荷层,确切说是有源负荷。自本世纪初其概念诞生至今,微电网技术取得了快速发展。文中简要介绍了微电网的组成及关键技术,阐述了近年来微电网技术的研究热点及国内外应用研究现状。

1 微电网技术简介

1.1 微电网的组成

微电网的组成包括:(1)微电源或微源,内容涵盖风电、光伏、燃料电池、微型燃气轮机、生物质发电等分布式电源;(2)储能装置,包括功率型(如飞轮、超级电容)和能量型(如铅酸电池、锂电池);(3)监控单元及调度体系;(4)负荷,包括不可中断负荷和可中断负荷;(5)离并网开关,用于将微电网与主网分合。

1.2 微电网的关键技术

微电网关键技术包括:新型电力电子技术、故障监测与保护技术、通信技术、规划技术、运行控制及能量管理技术等。美国、欧洲、日本等地区开展微电网研究已有多数。近年,我国也开始关注这一领

域,并已在北京、郑州和广东等地建设了试点工程。就微源与微电网的协调及微电网自身与主网的协调而言,其尚存的技术难点包括:(1)离并网时的无缝切换技术;(2)储能技术及成本;(3)不同时间尺度上微电网内的电量自平衡。

2 微电网技术的研究热点

微电网概念自提出以来,学术界的研究方向主要包括:(1)微电网控制技术;(2)微电网的负荷跟踪及能量管理;(3)微电网保护。近年来的研究则衍生出一些新的热点,可将其划分为2类:一是将传统大电网、配电网的研究课题直接或改动后植入微电网环境下进行新的学术审视和考察,在新背景下继续挖掘“旧课题”的新内涵,如将传统的黑启动概念下放到微电网中,就衍生出微电网黑启动能力的研究^[1]。二是一些拓新课题,如微电源建模、微电网通信架构和技术^[2]。

2.1 微电网的能量管理

微电网的能量管理是指通过调节微源及储能出力、投切负荷、改变网架结构等手段以满足不同时间尺度上系统的能量平衡和频率稳定。频率波动来自两方面:(1)风、光等间歇性能源的出力波动;(2)主网与微电网交换功率的波动。微电网离网时的频率控制问题,实质是选取某个或多个出力源参与频率调节的过程。例如,对于燃料电池,可通过控制其电解槽的动态响应来平衡系统有功波动^[3]。对于交直流混合微电网,由于直流微电网不存在频率问题,因此能量管理策略上允许更灵活,其核心是维持交直流母线电压的稳定。

在频率调节方面,储能具有重要作用。蓄电池等能量型储能用以平抑数分钟乃至数小时尺度上的能量波动,着眼点是宏观上的能量平衡;而飞轮等功率型储能用于应对毫秒级乃至分钟级的短时功率波

动,着眼点是微观上的瞬时功率平衡。但是如何实现不同时间尺度上控制策略的自适应切换是实践中的难点。

能量管理的另一个研究热点是微源、储能及负荷的优化运行。与传统配电网不同,此类问题的求解需考虑微电网自身的特点:(1)潮流控制模式,即是否允许双向潮流,双向潮流的上下限等都会影响微电网的运营成本。(2)微电网经调问题本质上是多目标的,其目标函数除发电成本外,还需考虑各种环境因素,如最小化碳排放治理成本及离并网切换时用户的停电成本。(3)微电网经调问题本质上是多约束的,需考虑运行模式(并网或离网)、电价机制(如分时电价)、是否提供辅助服务(如供热)等约束。此外,求解算法上,人工智能算法如粒子群、模糊优化等也有所应用^[4]。

2.2 微电网的控制策略

早在 1998 年,Lasseter 等在针对分布式电源控制的讨论中就提出了基于逆变器下垂控制来分摊负荷的思想。其认为可将光伏、燃料电池等出力源视为“原动机”范畴,依靠储能配合可实现不论何种原动机类型的微源接入,微电网对外部电网和负荷都能表现出“一致性”^[5]。

微电网除了并网、离网 2 种稳态运行模式外,还存在二者间的过渡过程。过渡过程的电能质量优劣与否是评价微电网控制策略的重要判据之一。微电网的不同运行方式及微源并网接口的拓扑形式都会导致其控制策略的多样性。此外,储能单元的配置也会影响控制策略的选取。微电网的控制微观上主要是对电力电子变换器的控制,变换器作为微源与微电网的主要接口扮演着能量转化和扰动缓冲的重要角色。其研究的另一重点是离网下的自治稳定运行。微电网离网运行较之并网运行的最大区别在于:并网时,其从 PCC 处获取主网电压的频率及幅值参考信号以和主网同步运行,离网时,其需设定新的参考信号以实现自治运行。

就学术界已提出的微电网控制架构来说主要有 2 类,一类是以欧盟 MICROGRIDS 项目提出的微电网中央控制器(MGCC)为代表的主从控制,可以是单主或多主模式^[6];另一类是以美国 CERTS 微电网为代表的对等控制,各微源处的控制器都能响应系统负荷需求并自动分摊且无需借助和其他微源间的通信。

当前,主从控制的研究主要围绕 MGCC 为核心的控制体系展开。如将模糊理论用于微源本地控制器的设计^[7];将最小化势函数法用于 MGCC 的设计等^[8]。当然,主从控制需借助 MGCC 与各微源本地

控制器间的频繁通信,故会增加系统成本。

对等控制的研究重点是对传统下垂控制器进行改进。针对低压线路呈阻性的特点,有学者提出基于虚拟同步旋转轴的解耦控制策略^[9]。针对传统下垂控制存在的抗干扰性差等不足,有 2 种改进措施,一是从外环入手,如采用带高阶微分修正项的下垂控制或自适应下垂系数以克服离网下的不确定扰动。二是修改内环,如引入高级滑模控制算法^[10],避免微电网电压在负荷或电源出力剧烈变化时震荡。

实践中由于下垂深度不能太大等原因,下垂控制在当前实际工程中应用较少,大多采用主从控制。考虑到未来通信成本的进一步下降,各种实用化的主从控制算法的实现和改进仍是今后一段时期微电网控制研究的重点。

2.3 微电网的稳定性

当前,对微电网稳定性的研究多集中于小扰动稳定性分析,研究手段大多为用状态空间法对微电网系统建模,在平衡点处线性化后求出状态矩阵的特征根来进行稳定性判定。就稳定性而言,微电网的一个特点是其网内会存在较多分散接入的间歇性出力源,因此在研究稳定性时可考虑随机性因素,由此也衍生出基于概率理论的稳定分析算法,如点估计法^[11]。另一显著不同在于,微电网中可能同时存在旋转型和逆变型电源,尤其是同时考虑旋转型及逆变型电源时,研究思路较为新颖,可以探讨诸如微电网临界稳定时,逆变型电源与旋转型电源的出力比例等问题。

此外,现有研究大多针对微电网自身稳定性而未涉及微电网与配网稳定性的相互影响,鉴于此,后者可作为微电网稳定性进一步的研究方向。

2.4 微电网的建模仿真

微电网的建模仿真主要集中于微源本体建模和逆变器等电力电子接口建模。从工具上来看,以 MATLAB/Simulink 和 PSCAD/EMTDC 为主。也有学者从较新的视角针对微电网某一专题采用多学科手段建模,如将风电、光伏出力用概率分布进行表征,并采用蒙特卡罗法对微电网供电可靠性进行分析^[12];或借助负荷建模理论,利用元件的相似性对微网整体建模^[13],也是一种新颖的研究思路。

2.5 微电网的继电保护

微电网保护的研究源自对 DG 保护的研究。由于仅为少数 DG 保护进行分散投资,无论从成本还是保护配置维护上而言并不经济,因此,更好解决方案是将众 DG 构成微电网,并视作整体来进行保护设计^[14]。然而,微电网接入会对配网保护产生如下根本性影响:

(1) 传统配网辐射供电、单向潮流的特点将不复存在,原有遵循时序配合的三段式保护需加装方向元件或纵联保护。配网发生故障时,微电网会提供故障电流,此时原有配网保护需重新配置。

(2) 保护设计需考虑是否允许故障后微电网离网运行。微电网离网与并网 2 种模式下的保护设计有所不同:并网时,逆变器输出电流受上限约束(如热约束),故障时不能提供足够大的短路电流,与离网运行时有较大差异,故保护配置需分开设计。针对离网时微电网的保护问题,需研究针对逆变型电源的新型故障定位及类型识别算法^[15]。

微电网保护的研究趋势包括:(1) 在传统方法上融入人工智能技术和新型暂态保护原理,以提高保护对方向信息的敏感性;(2) 基于分层分区或多代理思想的多级保护体系设计;(3) 直流微电网保护设计。

2.6 其他

关于微电网的潮流计算,如何尽可能少地修改雅克比矩阵以提高算法效率是研究重点,有学者主张根据出力特性划分不同微源在潮流计算中的节点类型^[16]。基于多代理系统(MAS)的控制架构是当前微电网控制领域的前沿方向之一。所谓多代理控制,即将人工智能领域的智能代理(agent)概念映射到实际微电网中的各部分,如主电网 Agent、微电网 Agent 和元件 Agent^[17]。通过 Agent 通信来完成微电网的控制。研究手段大多是利用开源的多代理建模平台如 JADE、Zeus^[18]等对 Agent 间的协调控制策略进行离线或实时的仿真验证。

3 国内外应用研究现状

近年来微电网的研究不仅在前述理论方面取得了较大进展,另一方面,国际上众多示范工程及试验系统也相继建立起来^[19],为微电网应用研究奠定了基础:美国,CERTS 的微电网项目已在俄亥俄州的 Dolan 技术中心进行了物理装置的测试。欧洲,希腊、德国等地已有微电网示范项目处于运行阶段。日本、英国等发达国家也开展了适合本国国情的微电网研究计划。如日本的微电网应用研究主要在其发展较成熟的光伏设施基础上,走以家庭光伏并网发电、商业中心区燃料电池电站配合储能为特色的微电网建设路线。

目前,国内微电网应用研究单位集中在部分高校、科研院所及电力企业,如天津大学、合肥工业大学、杭州电子科技大学、中科院电工所、中国电科院等,各自建立了相应的微电网示范项目或实验室,研究微电网的控制、运行及对主网安全稳定运行的影

响。实际工程方面,由于牵涉到电网的正常运营,因此必须由电网公司主导进行,如国家电网公司建设的河南财专微电网示范工程,作为国内第一个正式投入运行的微电网试点项目,取得了良好的运行业绩和社会效益。

可以看出,当前国内微电网应用研究的特点是涉研单位较广,但尚无某个机构拥有完整的集试验、仿真、检测等功能于一体的微电网应用研究平台。因此,就微电网应用研究而言,我国目前在国际上的知名度和影响力还较为有限,另一方面也表明在国家电监会及各电网公司等部门的政策支持下,国内相关单位在此领域还大有可为。

4 结束语

综上所述,微电网是以逆变型微电源为主的小型供电网络,能量管理上具有较高的自治性和灵活性,其核心技术是离网稳定运行及离并网时的无缝切换。文中认为微电网技术后续的研究可着眼于:微电网能量管理及通信架构;实用化的离网运行控制及无缝切换技术;微电网与配网稳定性的相互影响;微电网继电保护的新算法和新架构;微电网运营的政策法规研究;微电网建模仿真及一体化试验平台。

参考文献:

- [1] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, Resende F O. Microgrids Black Start and Islanded Operation [C]. Proceedings of 15th Power Systems Computation Conference, 2005.
- [2] SIOW L K, SO P L, GOOI H B, et al. Wi-Fi Based Server in Microgrid Energy Management System [C]. IEEE TENCON 2009 Proceedings, 2009.
- [3] LI X J, SONG Y J, HAN S B. Frequency Control in Micro-grid Power System Combined with Electrolyzer System and Fuzzy PI Controller [J]. Journal of Power Sources, 2008 (180): 468-475.
- [4] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析 [J]. 电网技术, 2009, 33(20): 38-42.
- [5] NIKKHAJOEI H, LASSETER R. Distributed Generation Interface to the CERTS Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1598-1608.
- [6] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2): 916-924.
- [7] PAPADIMITRIOU C N, VOVOS N A. A Fuzzy Control Scheme for Integration of DGs into a Microgrid/[C]. Proceedings of 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010.
- [8] MEHRIZI-SANI A, IRAVANI R. Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-connected Modes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (4):

- 1883-1891.
- [9] LI Y, LI Y W. Decoupled Power Control for an Inverter Based Low Voltage Microgrid in Autonomous Operation [C]. Proceedings of IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009.
- [10] MOHAMMADHASSAN A S, GEVORG B G. Dynamic Performance Enhancement of Microgrids by Advanced Sliding Mode Controller [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 21(4): 1-7.
- [11] XU X L, LIN T, ZHA X M. Probabilistic Analysis of Small Signal Stability of Microgrid Using Point Estimate Method [C]. Proceedings of International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009.
- [12] YOKOYAMA R, NIIMURA T, SAITO N. Modeling and Evaluation of Supply Reliability of Microgrids including PV and Wind Power [C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting, 2008.
- [13] 鞠 平, 蔡昌春, 曹湘芹. 基于物理背景的微网总体建模[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 7-11.
- [14] LAAKSONEN H J. Protection Principles for Future Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2910-2918.
- [15] 王 伟. 含微网配电系统的继电保护问题研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [16] ZHANG Y P, LU Y P. A Novel Newton Current Equation Method on Power Flow Analysis in Microgrid [C]. Proceedings of IEEE PES General Meeting, 2009.
- [17] 章 健, 艾 芊, 王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 80-82.
- [18] FERROZE H. Multi-Agent Systems in Microgrids Design and Implementation [D]. Arlington: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [19] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.

作者简介:

朱永利(1987), 男, 硕士研究生, 从事微电网运行控制、分布式电源建模研究工作;

姚建国(1963), 男, 研究员级高级工程师, 从事智能电网技术、电网调度运行研究工作;

刘 骥(1967), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析、配电自动化研究工作。

Key Technologies and Developing State of Microgrid

ZHU Yong-li, YAO Jian-guo, LIU Ji

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The microgrid technology can solve the whole uncontrolled problem caused by traditional distributed generation dispersant integration and independent grid connection. When there is grid disturbance, microgrid control technology can effectively solve the power quality problem of key load in single distributed power and thus helpful to improve the power grid controllability. The hotspots and developing tendency of microgrid technology in recent years are described in the aspects including energy management, control strategy, protective relaying and so on. Besides, some key technical problems required to solve are also discussed. Combined with the relevant demonstration projects, the domestic application and research situation are introduced and the future development direction of microgrid technology is also proposed.

Key words: microgrid; distributed generation; seamless handover; master-slave control; peer-to-peer control

(上接第 80 页)

顾孟祥(1970), 男, 江苏苏州人, 工程师, 从事发电机组设备管理工作;

曾云峰(1977), 男, 江苏苏州人, 助理工程师, 从事发电厂运行

管理工作;

刘 波(1973), 男, 江苏苏州人, 工程师, 从事发电厂运行管理工作。

Analysis and Solution for Over High Hydrogen Content of the Water-hydrogen-hydrogen Stator Coolant in One 300 MW Power Plant

SHI Song-mei, FAN Chao-guang, GU Meng-xiang, ZENG Yun-feng, LIU Bo

(Taicang Xiexingang Power Generation Co.Ltd., Suzhou 215433, China)

Abstract: Issues on the over high hydrogen content of the water-hydrogen-hydrogen stator coolant occurred in 4' power plant of Taicang Xiexin Power Generation Co.Ltd. are analyzed in this paper. According to the system constitution as well as the field inspection results, a reasonable solution scheme aiming to ensure the hydrogen content to be in an allowable scope is determined. To prevent the similar issues from happening again, prevention measures are also proposed in the current work.

Key words: water-hydrogen-hydrogen power plant; hydrogen content of stator coolant; analysis and solution; prevention measures