

静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法

李 旷, 刘进军, 魏 标, 王兆安

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Control and Optimization of Static var Generator for Grid Voltage Unbalance Mitigation

LI Kuang, LIU Jin-jun, WEI Biao, WANG Zhao-an

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In this paper, a direct-current-controlled Static Var Generator (SVG) is proposed to solve the voltage unbalance issue at the Point of Common Coupling (PCC). The SVG is operated as a current source controlled by the negative sequence voltage at the PCC. The relationship between all the parameters and the compensating characteristics is analyzed in detail. And an optimum control parameter is decided. The negative sequence voltage decomposition method is also introduced. Simulation and experiment results verify the satisfactory performance of the SVG in compensating voltage unbalance with the proposed control strategy.

KEY WORDS: Power system; Static var generator(SVG); Voltage unbalance; Point of common coupling(PCC); Voltage controlled current source(VCCS)

摘要: 针对电网电压不平衡问题, 提出了一种用静止无功发生器(SVG)抑制公共连接点(PCC)不平衡电压的控制方法。该方法既发挥了 SVG 补偿系统无功功率的优势, 又在电网电压严重不平衡时扩展了 SVG 的补偿功能, 充分地利用了补偿装置。文中详细讨论了 SVG 补偿电网电压不平衡的原理, 将 SVG 控制作为受负载端负序电压控制的电流源, 分析了其补偿性能与各个参数的相互关系。在补偿效果相同的前提下, 对系统的控制参数进行了优化, 使 SVG 的补偿容量最小。最后介绍了 PCC 处负序电压的实时检测方法。仿真和实验结果表明, 该方法可以有效地补偿电源或负载引起的电压不平衡问题。

关键词: 电力系统; 静止无功发生器; 电压不平衡; 公共连接点; 电压控制电流源

1 引言

三相电压不平衡度是衡量电网电能质量的一

个重要指标。随着人们对电能质量要求的提高, 电压不平衡问题正受到越来越多的关注^[1-13]。IEEE 和 IEC 均对电压不平衡度的定义、最大允许值等做了明确的规定。我国国家技术监督局颁布的国家标准 GB/T 15 543-1995 《电能质量 三相电压允许不平衡度》中规定, 电力系统公共连接点 (Point of Common Coupling, PCC) 正常电压不平衡度允许值为 2%, 短时不得超过 4%^[2]。文献[1]表明, 大约有 10% 的配电系统电压不平衡度 (Voltage Unbalance Factor, VUF) 大于 3%。

在三相系统中, 引起 PCC 电压不平衡的原因主要来自两方面: 发电机的输出电压不平衡^[1]和负载不对称^[7-8]。理论上讲, 发电机的输出电压并不是完全对称的, 具有一定的不平衡度, 但都应限制在标准所允许的范围内。此外, 配电端的三相负载不可能完全对称, 特别是在大容量单相负载存在的场合, 电压不平衡问题尤为严重。因此, PCC 处电压不平衡总是存在的。当电压不平衡较为严重时, 就会影响某些设备的正常工作, 如电机、电力电子装置等。解决电网电压不平衡的问题有各种方法, 而如何利用各种电力电子补偿装置来抑制电网电压的不平衡, 是近年来电能质量控制领域的研究热点之一^[9-11]。

静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 是并联于公共连接点的电力电子装置, 往往用来补偿负载的无功功率^[11-14], 或者通过对无功功率的控制来调节电网电压的幅度^[15-17]。传统的 SVG 装置大

都控制为电压源，并且 SVG 不输出负序电压^[12-17]。由于系统中负序阻抗较小（一般小于 0.2pu），0.1pu 的负序电压就会产生大约 0.5pu 的负序电流，导致 SVG 过流而无法正常工作^[12-14]。为此，文献[12]提出了把 SVG 控制为电压源来抵消此不平衡电流的方法，但却不能对由电网侧引起的 PCC 处不平衡电压进行补偿。另一方面，当系统电压严重不平衡时，在传统的控制方法下还对系统进行无功补偿可能会导致系统的不稳定。如何在补偿无功的基础上进一步扩展 SVG 的功能，也是目前 SVG 的发展趋势之一^[9,11-12,14]。本文在 SVG 基本功能的基础上，提出了一种新的控制方法，该方法既可以补偿电网电压不平衡，又可以根据实际情况的需要，将 SVG 切换到传统的补偿负载电流不对称的控制方法。此外，文章还对补偿电网电压不平衡时的控制参数进行了优化。通过调节 SVG 输出的补偿电压相位，使 PCC 处的负序电压幅值最小。该优化方法能达到补偿效果最好的同时，使 SVG 装置的容量最小。

2 系统构成

SVG 系统的结构如图 1 所示。它由 IGBT 三相变流器、信号检测电路、基于 TMS320F2812 型 DSP 的控制电路、驱动电路和基于 89C196 的触摸屏监控系统构成。信号检测电路需要检测 PCC 点三相电压、三相负载电流、SVG 输出三相电流和 SVG 直流侧电容电压。单片机 89C196 控制电路完成系统电压电流信号采集、处理以及与触摸显示屏和 F2812 之间的数据交换。基于 F2812 的控制电路为控制系统的核心，主要完成信号采集、处理，数据交换，PWM 脉冲生成，保护信号输出等。

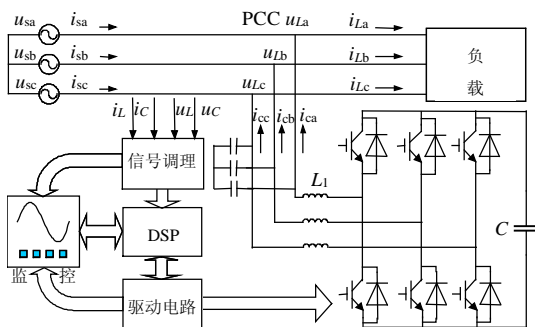


图 1 与电网连接的 SVG 系统结构框图
Fig. 1 System configuration of the static var generator connecting to the grid

本系统中，SVG 被控制为电流源。当补偿无功功率时，SVG 产生与负载无功电流大小相等、方向相反的补偿电流，以实现提高系统功率因数、调节

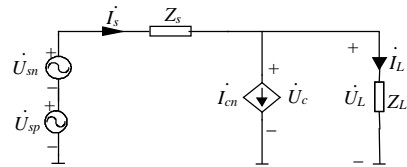
系统电压的功能。当补偿电网电压不平衡时，SVG 产生足够大的负序电流，使电网中的负序电压几乎全部降在系统阻抗上，从而保证 PCC 处的三相电压有较好的平衡度。本文主要讨论 SVG 补偿 PCC 处电压不平衡的控制方法及其优化。

3 控制与优化方法

对图 1 所示的 SVG 系统，其基波分量单相等效电路如图 2 所示。其中， U_{sp} 和 U_{sn} 分别表示电网的基波正序电压和负序电压分量； Z_s 和 Z_L 分别表示电网内阻和负载的基波阻抗；SVG 被控制为电流源 I_c ，且

$$\dot{I}_c = k\dot{U}_{Ln}e^{-ja} \quad (1)$$

式中 U_{Ln} 为 PCC 处的负序电压分量， a 为 I_c 和 U_{Ln} 之间的相位差。因此时 SVG 为电网负序电压控制的电流源 (VCCS)，因此理论上说，SVG 输出的补偿电流均是负序电流 I_{cn} 。



注：下标 p 为正序分量；n 为负序分量

图 2 系统单相等效电路图

Fig. 2 Single phase equivalent circuit with VCCS control

为清晰起见，将分别考虑负载与不考虑负载 2 种情况讨论 SVG 补偿电压不平衡的工作原理。

在图 2 中，如果负载开路，可以求得

$$\dot{U}_{Ln} = \frac{1}{1+kZ_s e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (2)$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{U}_{Ln} = \frac{1}{1+kZ_s e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{cn} = \frac{ke^{-ja}}{1+kZ_s e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (4)$$

$$\dot{U}_{cp} = \dot{U}_{sp} \quad (5)$$

其中， U_{cp} 和 U_{cn} 分别为 SVG 两端的正序电压和负序电压分量。

从式(2)可知，当 $k \geq 0$ 时，PCC 处的负序电压就会减小。只要控制 k 为合适的值，就可以保证 PCC 处的电压不平衡度在允许的范围内。

为了估算 SVG 的容量，引入等效电压和等效电流概念，其值均为正序分量和负序分量平方和的平方根^[18]。这里，SVG 的等效电压 U_e 和等效电流 I_e 分别为

$$U_e = \sqrt{U_{cp}^2 + U_{cn}^2} \quad (6)$$

$$\dot{i}_e = \dot{i}_c \quad (7)$$

$$\dot{i}_s = \dot{i}_c \quad (8)$$

此时 SVG 的容量近似为

$$S_c = 3U_{sn} \left| \frac{ke^{-ja}}{1+kZ_s e^{-ja}} \right| \sqrt{\left| \frac{1}{1+kZ_s e^{-ja}} \right|^2 U_{sn}^2 + U_{sp}^2} \quad (9)$$

从以上的分析可以看出, SVG 的补偿效果、补偿电流和容量与 k 和 a 密切相关。在 k 一定的情况下, 确定 a 的最佳值就是对系统性能的优化。如果 Z_s 为纯感性, 从图 3 可以看到, $a = 90^\circ$ 时, U_{Ln} 、 I_{cn} 和 S_c 同时取最小值, 此时的 a 值为最优值。为了更具一般性, 假设 $Z_s = |Z_s| \angle q_s$, 那么

$$U_{Ln_min} = \frac{1}{|1+ke^{-ja}Z_s|_{\max}} U_{sn} = \frac{1}{|1+k|Z_s| \angle(q_s - a)|_{\max}} U_{sn} \stackrel{a=q_s}{=} \frac{1}{1+k|Z_s|} U_{sn} \quad (10)$$

由式(10)可知, $a = q_s$ 时系统性能最优。

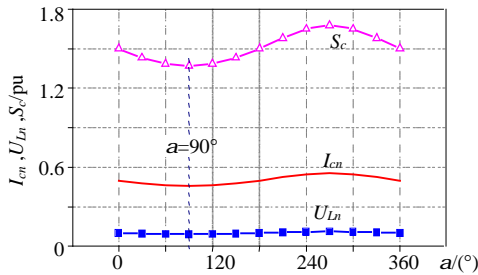


图 3 U_{Ln} , I_{cn} , S_c 与 a 之间的变化关系曲线

Fig. 3 The relationship between U_{Ln} , I_{cn} , S_c and a

相似地, 当负载为 Z_L 时, 有如下的等式成立:

$$\dot{U}_{Ln} = \frac{Z_L}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (11)$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{U}_{Ln} = \frac{Z_L}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (12)$$

$$\dot{U}_{cp} = \frac{Z_L}{Z_s + Z_L} \dot{U}_{sp} \quad (13)$$

$$U_e = \sqrt{U_{cp}^2 + U_{cn}^2} \quad (14)$$

$$\dot{i}_{cn} = \frac{kZ_L e^{-ja}}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (15)$$

$$\dot{i}_{sp} = \frac{1}{Z_s + Z_L} \dot{U}_{sp} \quad (16)$$

$$\dot{i}_{sn} = \frac{1+kZ_L e^{-ja}}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \dot{U}_{sn} \quad (17)$$

$$I_s = \sqrt{I_{sp}^2 + I_{sn}^2} \quad (18)$$

$$S_c = 3U_{sn} \left| \frac{kZ_L e^{-ja}}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \right|$$

$$\sqrt{\left| \frac{Z_L}{Z_s + Z_L + kZ_s Z_L e^{-ja}} \right|^2 U_{sn}^2 + \left| \frac{Z_L}{Z_s + Z_L} \right|^2 U_{sp}^2} \quad (19)$$

在式(11)中, 随着控制量 k 的增大, 负载上的负序电压 U_{Ln} 变得越来越小, 从而实现了补偿电压不平衡的功能。

同理, 为了确定出 a 的最佳值, 假设 $Z_s = |Z_s| \angle q_s$, $Z_L = |Z_L| \angle q_L$, 且 $1 + |Z_s / Z_L| \angle(q_s - q_L) = |Z_{sL}| \angle q_{sL}$, 那么

$$U_{Ln_min} = \left| \frac{Z_L U_{sn}}{Z_s + Z_L + ke^{-ja} Z_s Z_L} \right|_{\min} = \frac{U_{sn}}{|1+ke^{-ja}Z_s+Z_s/Z_L|_{\max}} = \frac{U_{sn}}{|1+k|Z_s| \angle(q_s - a) + |Z_s/Z_L| \angle(q_s - q_L)|_{\max}} = \frac{U_{sn}}{|k|Z_s| \angle(q_s - a) + |Z_{sL}| \angle q_{sL}|_{\max}} \stackrel{a=q_s - q_{sL}}{=} \frac{U_{sn}}{|k|Z_s| + |Z_{sL}|} \quad (20)$$

由式(20)可知, $a = q_s - q_{sL}$ 时系统性能最优。其向量关系如图 4 所示。

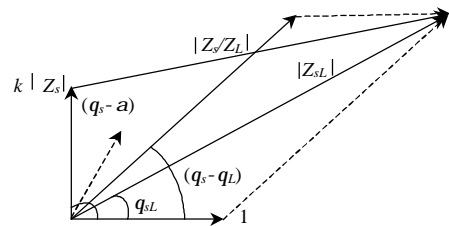


图 4 a 取最优值时向量之间的关系

Fig. 4 Vectors relationship in determining optimum a

图 5 画出了 SVG 系统各参数之间的变化关系曲线。从图 5(a)可以看出, 随着 k 的增加, U_{Ln} 、 U_c 、 U_e 逐渐减小, 而 I_c 、 I_e 、 S_c 逐渐增加。图 5(b)中, U_{Ln} 、 U_c 、 U_e 、 I_c 、 I_e 、 S_c 随负载阻抗的增加逐渐变大。图 5(c)表明, 要使 PCC 点的负序电压 U_{Ln} 变小, SVG 的补偿电流必须增加, 这也导致 SVG 的容量变大。

从以上的分析还可以看出, 整个过程与负载平衡与否无关。其实, 无论负载是否平衡, 这种方法对抑制负载端负序电压都是有效的。

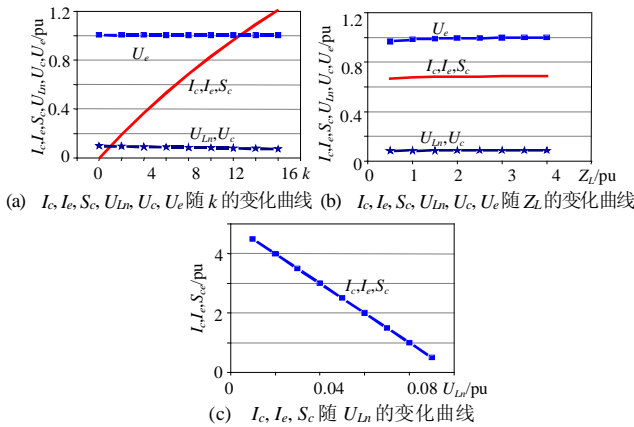


图 5 $I_c, I_e, S_c, U_{Ln}, U_c, U_e, Z_L, k$ 之间的关系曲线
Fig. 5 The relationship among $I_c, I_e, S_c, U_{Ln}, U_c, U_e, Z_L, k$

4 能量流动与指令检测

在 SVG 系统中，无论是补偿无功功率还是电网电压不平衡，归根结底是控制 SVG 与电网之间能量的交换。也就是 SVG 直流侧储能电容与电网之间的能量流动，它决定了控制策略的可行性和系统的补偿效果。

对基波正序分量而言，由于流过 SVG 的基波正序电流为零，所以有

$$P_+ = U_{cp} I_{cp} = 0 \quad (21)$$

对基波负序分量而言，有

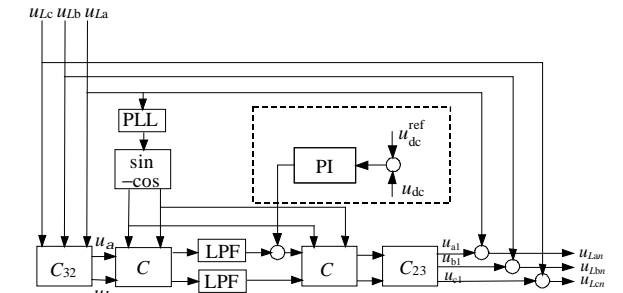
$$\begin{aligned} P_- &= \text{Re}(\dot{U}_{Ln} \dot{I}_{cn}^*) = \text{Re}[\dot{U}_{Ln} (k \dot{U}_{Ln}^* e^{-j\alpha})] = \\ &= \text{Re}(k \dot{U}_{Ln} \dot{U}_{Ln}^* e^{-j\alpha}) = k \dot{U}_{Ln} \dot{U}_{Ln}^* \text{Re}(e^{-j\alpha}) = \\ &= k U_{Ln}^2 \cos \alpha \end{aligned} \quad (22)$$

从式(22)可以看出，SVG 吸收的有功功率由系统的负序分量决定，其幅值取决于 k 和 α 的大小。同时，由上文对 α 取值的分析可知，SVG 与电网之间交换的主要是无功功率，理论上可以做到 SVG 吸收的有功功率为零。当然，实际中为了维持直流侧电容电压的稳定，必须对 SVG 所吸收的有功功率进行控制。本文中对 SVG 直流侧电容电压的控制方法见图 6 中虚线框内所示。根据检测到的 SVG 直流侧电容两端的实际电压 u_{dc} ，与设定电压 u_{dc}^{ref} 进行比较，得到两者之间的误差，误差信号通过 PI 调节器后作为 pq 坐标系下的有功指令，再经过两级变换得到时域下的 SVG 的有功指令电流。

同时，如何快速、准确地检测出系统电压或电流中需要补偿的分量也是近年来的研究热点之一^[19-22]。为了对电网的不平衡电压进行实时补偿，本文采用以瞬时无功功率理论为基础的检测算法，其框图如图 6 所示。在忽略电网谐波电压的情况下，这种检

测算法能及时、准确地将不平衡电压分离出来，并且具有较好的动态和稳态性能。

此外，如果需要从补偿电网电压不平衡的功能切换到对负载的不平衡电流进行补偿，可以在电网电压过零时，采集负载的三相电流，然后根据一定的运算方法分离出负载中不平衡的电流分量，从而得到 SVG 的补偿指令。这种切换从软硬件上实现都非常方便。



图中 $C = \begin{bmatrix} \sin wt & -\cos wt \\ -\cos wt & \sin wt \end{bmatrix}$, $C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$, $C_{23} = C_{32}^T$ 。

图 6 负序电压检测与直流侧电压控制框图
Fig. 6 The algorithm of reference voltage decomposition

5 仿真与实验

本文对图 1 所示的 SVG 系统进行了仿真研究，仿真结果如图 7 所示。图 7(a)是当负载为三相平衡的电阻时的仿真波形。从图可以看出，SVG 投入前，PCC 点的负序电压峰值为 70V，SVG 开始工作后，PCC 点的负序电压峰值下降到 8V 以内。此外，负载的不对称电流也几乎得以完全补偿。从仿真波形还可以看出，SVG 的响应速度非常快，从而可以实现对 PCC 点不平衡电压的快速、动态补偿。图 7(b)是系统带整流性负载时的仿真波形，可以看到 SVG 的补偿效果还是令人满意的。

为了进一步验证本文所提方法的有效性，最后进行了实验。实验中，为了模拟电网电压不平衡的情况，把可编程交流电源 Chroma 6590 当作 SVG 系统的电源。可编程交流电源的三相输出电压可以视需要任意设置其基波和谐波的幅值及相位，还可以选择输出常见的矩形波、阶梯波、梯形波电压等，为实验研究提供了很多方便。

实验中，负载为带电阻和电感的三相二极管整流桥，实验结果如图 8 所示。其中，图 8(a)和(b)分别为 SVG 投入前与投入后的负载端三相相电压。可以看出，补偿后 PCC 点电压的不平衡度明显降

低, 达到了很好的补偿效果。图 8(c)和(d)分别为 SVG 投入前与投入后的负载端三相电流, 其不平衡度也明显降低, 从而实现了 SVG 补偿电网电压不平衡的功能, 验证了本文所提出的控制方法的有效性。

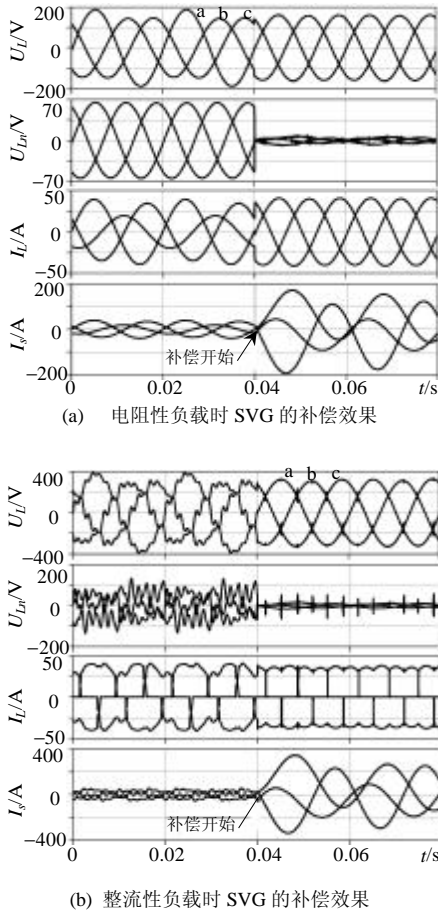


图 7 不同负载情况下的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under different load conditions

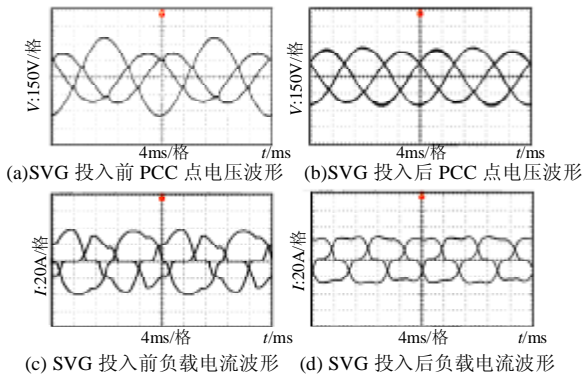


图 8 带整流性负载时的实验波形

Fig.8 Experiment results with diode rectifier load

6 结论

电压不平衡度是衡量电网电压的一个重要参数。本文在 SVG 补偿无功功率的基础上, 提出一

种在电网电压严重不平衡时用 SVG 补偿 PCC 处不平衡电压的控制方法。这样, 既安全、有效地发挥了 SVG 补偿无功的作用, 又扩展了 SVG 的补偿功能, 不失为一种好的选择。此外, 根据实际需要, 可以很方便地将 SVG 切换到补偿负载电流不平衡的功能。根据本文可以得到如下结论:

- (1) 利用 SVG 可以补偿电源电压的不平衡, 也可以补偿由负载不平衡引起的电压不平衡。从而保证 PCC 点的电压在允许的不平衡度范围内;
- (2) 本文提出的将 SVG 控制作为电流源来补偿电压不平衡的控制方法是有效的, 补偿效果与控制参数密切相关;
- (3) 参数优化对系统补偿效果和 SVG 的补偿容量有着重要的影响, 它主要体现在对 SVG 输出电压相位的调节上。合理地选择此相位可以保证 SVG 在补偿效果最好的条件下, 其补偿容量最小;
- (4) 在补偿电网电压不平衡时, SVG 除吸收维持直流侧电容电压稳定的少量有功能量外, 与电网之间只交换无功功率。

参考文献

[1] Jouanne A, Banerjee B. Assessment of voltage unbalance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 782-790.

[2] 中国国家标准 GB/T15543-1995: 电能质量 三相电压允许不平衡度 (China National Standards GB/T15543-1995: Power Quality Three Phase Permissible Voltage Unbalance Factor) [S]. 北京: 中国标准出版社 (Beijing: China Standards Press), 1995.

[3] 李可军, 赵建国, 徐文远. 三相不平衡电力系统的潮流双解研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 62-66.

Li Kejun, Zhao Jianguo, Xu Wenyuan. Study on power flow dual solutions in unbalanced three-phase power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 62-66.

[4] 吴政球, 荆勇, 赵忠堂. 考虑负序零序非线性求解的三相潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 77-81.

Wu Zhenqiu, Jing Yong, Zhao Zhongtang. Three phase power flow solution based on node injection currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 77-81.

[5] 彭力, 白丹, 康勇, 等. 三相逆变器不平衡抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 174-178.

Peng Li, Bai Dan, Kang Yong, et al. Research on three-phase inverter with unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 174-178.

[6] 王江, 孙胜红, 赵忠堂. 电压不平衡时三相矩阵交-交变频侧电流谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 70-74.

Wang Jiang, Sun Shenghong, Zhao Zhongtang. Input current harmonic analysis in three-phase matrix converters under input/output unbalance [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 70-74.

[7] 娄奇鹤, 高仕斌. 三相变四相变压器在AT供电系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 124-130.

Lou Qihe, Gao Shibin. Study on the application to AT power supply

- system of three-phase to four-phase transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 124-130.
- [8] 张志文, 王耀南, 刘福生, 等. 多功能平衡牵引变压器运行方式研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 125-132.
Zhang Zhiwen, Wang Yaonan, Liu Fusheng, et al. Study on Operational mode of multi-function balance traction transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 125-132.
- [9] 纪延超, 戴克健, 刘庆国, 等. 100kvar 广义电力有源滤波器(GAF)的仿真和实验[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 315-321.
Ji Yanchao, Dai Kejian, Liu Qingguo, et al. Simulation and experiment of generalized active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(5): 315-321.
- [10] 赵剑锋, 蒋平, 唐国庆, 等. 基于电压型逆变器的串联型电能质量补偿器与电力系统相互作用的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 75-82.
Zhao Jianfeng, Jiang Ping, Tang Guoqing, et al. Study of interaction between power system and VSI based series power quality compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 75-82.
- [11] 游小杰, 李永东, Victor V, 等. 并联型有源电力滤波器在非理想电源电压下的控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 55-60.
You Xiaojie, Li Yongdong, Victor V, et al. SAPF control strategy under the condition of non-ideal source voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 55-60.
- [12] Cavaliere C A C, Watanabe E H, Aredes M. Multi-pulse STATCOM operation under unbalanced voltages[C]. Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 2002: 567-572.
- [13] 李晓露, 段献忠, 何仰赞. 不平衡系统中 ASVG 动态建模研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 76-80.
Li Xiaolu, Duan Xianzhong, He Yangzan. Dynamic model of ASVG in unbalanced systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 76-80.
- [14] Singh B N, Chandra A, Al-Haddad A. DSP based indirect current controlled Statcom[J]. IEEE Proceedings on Electrical Power Application, 2000, 147(2): 107-118.
- [15] 孙元章, 王志芳, 卢强. 静止无功补偿器对电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 373-376.
Sun Yuanzhang, Wang Zhifang, Lu Qiang. The effects of SVC on the voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 373-376.
- [16] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. STATCOM 电压控制系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 46-50.
Li Chun, Jiang Qirong, Wang Zhonghong. Voltage regulation stability analysis of STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 46-50.
- [17] 张铭, 罗安, 何早红. 包含静止无功发生器的电力系统吸引域 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 25-28.
Zhang Min, Luo An, He Zhaohong. The domain of attraction for power system with STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 25-28.
- [18] IEEE Std 1459-2000: IEEE trial-use standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions [S]. IEEE Press, USA, 2000.
- [19] 王茂海, 刘会金. 通用瞬时功率定义及广义谐波理论 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 68-73.
Wang Maohai, Liu Huijin. A universal definition of instantaneous power and broad sense harmonic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 68-73.
- [20] 公茂忠, 刘汉奎, 顾建军, 等. 并联型有源电力滤波器参考电流获取的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 43-47.
Gong Maozhong, Liu Hankui, Gu Jianjun, et al. A novel method of calculating current reference for shunt active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 43-47.
- [21] 戴潮波, 林海雪, 雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 80-84.
Dai Chaobo, Lin Haixue, Lei Linxu. A study on the comparison of two harmonic current detecting methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 80-84.
- [22] 王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 56-59.
Wang Maohai, Sun Yuanzhang. Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 56-59.

收稿日期: 2005-10-15。

作者简介:

李 旷 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量控制技术及其应用;

刘进军 (1970-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术中电能质量控制、输配电系统以及分布式发电系统中的应用, 电力电子电路和系统的建模、仿真、分析和控制, 计算机控制系统及应用;

魏 标 (1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为谐波抑制和无功补偿控制技术;

王兆安 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术 (谐波抑制、开关电源、电力电子集成) 和工业自动化。

(责任编辑 喻银凤)