

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.020

# 电压偏差及负荷不平衡补偿的静止 无功补偿器控制方法

李润秋,朱岸明,王中阳,焦熠坤

(国网陕西省电力公司经济技术研究院,陕西 西安 710065)

**摘要:**针对企业配电网系统中电压波形波动以及三相负荷不平衡等问题,以静止无功补偿器(SVC)为研究对象,提出了一种基于电压偏差及负荷不平衡补偿的静止无功补偿器控制方法。采用 Ziegler-Nichols 方法,对 SVC 中电压控制器中参数进行了优化;通过采用虚拟对称三相系统的同步参考旋转坐标变换的补偿电纳的计算方法,对三相负荷的不平衡进行了补偿。仿真结果表明,该控制方法实现简单、运用灵活,且具有良好的动态响应速度及跟踪性能。

**关键词:**电压波形;静止无功补偿器;旋转坐标变换

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1258-05

## Voltage deviation and load unbalance compensation control method of static var compensator

LI Run-qiu, ZHU An-ming, WANG Zhong-yang, JIAO Yi-kun

(Shanxi Economic Research Institute, State Grid, xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the enterprise power distribution system voltage fluctuation and the three-phase load was not stable in static var compensator (SVC) as the research object, a kind of voltage deviation and unbalanced load compensation based static var compensator control method was proposed. The Ziegler-Nichols method was used to optimize the parameters of the voltage controller in SVC. Through virtual symmetrical three-phase system synchronous reference coordinate rotation transform compensation susceptance calculation method, the three-phase load imbalance was compensated. The simulation results show that the control method is simple, flexible and has good dynamic response speed and tracking performance.

**Key words:** voltage waveform; static var compensator; rotating coordinate transformation

## 0 引言

在配电网系统中,由于电感以及电容等设备的使用,在电力系统中存在各种有功功率,同时也存在无功功率。无功功率虽不消耗能量,它的能量只在电源和负载间进行传输,但在能量传输与交换的过程中,可能导致能量被损失<sup>[1-3]</sup>。

目前,随着先进的电力电子技术以及数字信号控制理论的发展,许多先进的 FACTS 在配电网中也随之发展起来。静止无功补偿器(SVC)是电力系统中比较

常用的一种 FACTS 电力设备<sup>[4-7]</sup>,在配电网系统中 SVC 与传统电力设备相比,SVC 可控性好、响应速度快。在补偿供电网络的无功功率、改善电压不平衡度、抑制电压波形波动以及不平衡负荷的平衡化补偿等方面得到了广泛的应用,能够显著提高配电网系统的稳定性,改善电能质量<sup>[8-10]</sup>。

本研究以 TCR-MSC 型静止无功补偿器为研究对象,将 SVC 电压偏差控制与 SVC 负荷不平衡补偿结合在一起,提出一种基于电压偏差及负荷不平衡补偿的静止无功补偿器复合控制方法。

# 1 基于 Ziegler-Nichols 的电压偏差控制

SVC 系统的拓扑结构如图 1 所示,由晶闸管控制电抗器 TCR 以及  $k$  个机械式投切电容器 MSC 组成。晶闸管控制电抗器采用“ $\Delta$  型”的连接方式,电容器采用“Y 型”的连接方法。

Ziegler-Nichols 的电压偏差控制框图如图 2 所示。修正后的参考电压( $U_{ref} + U_{SL}$ ) 与实际值  $U_{rms}$  之差  $U_e$  作为电网系统中电压控制器输入,导纳值  $B_V$  经过 TCR/MS C 导纳分配模块分别得到 TCR 与 MSC 所对应的导纳值  $B_{tcr}$  和  $B_{msc}$ ,  $B_{msc}$  通过电纳 - 角度函数变换可以得到晶闸管的导通率  $\delta$ ,通过控制  $\delta$  的大小可以控制

无功的投入量。电压偏差控制器实现框图如图 3 所示。

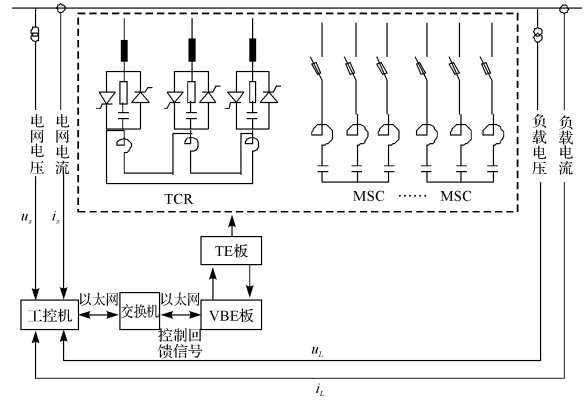


图 1 SVC 结构

$u_s$ —电网电压; $i_s$ —电网电流; $u_L$ —负载电压;  
 $i_L$ —负载电流

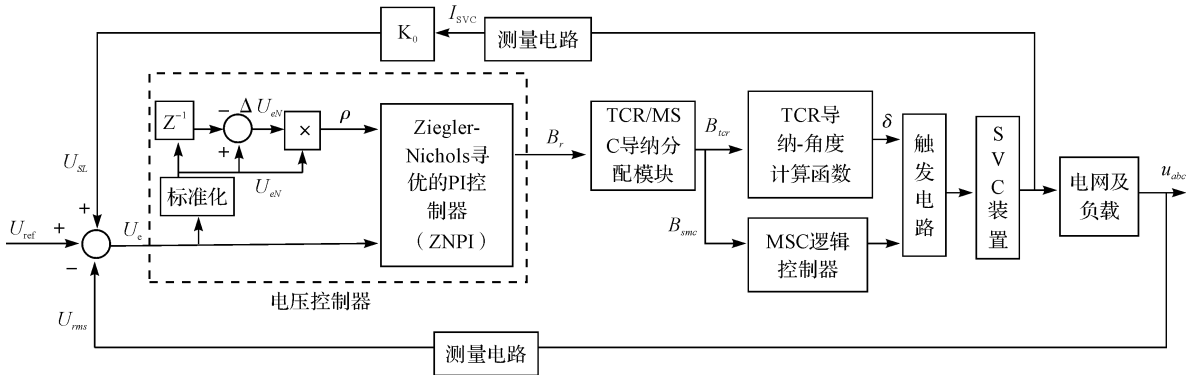


图 2 SVC 电压偏差控制框图

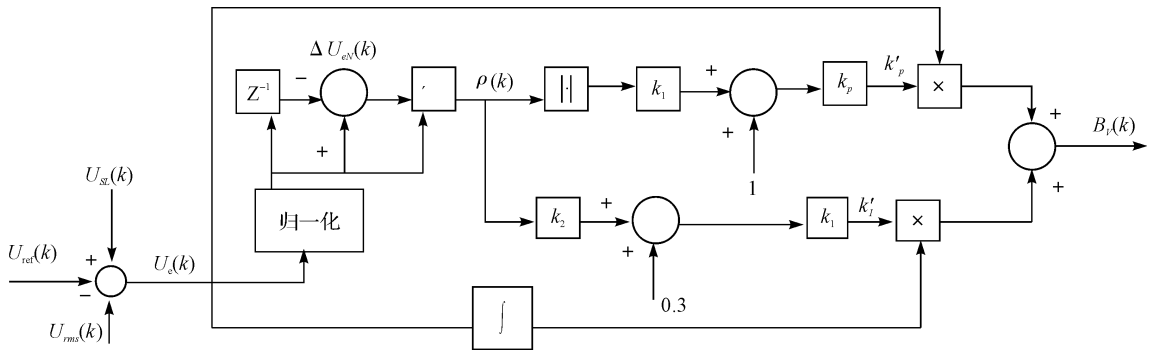


图 3 电压控制器的实现框图

传统 PI 控制器的离散表达式为<sup>[11-12]</sup>：

$$U_a(k) = k_p U_e(k) + k_l \sum_{i=0}^k U_e(i) \quad (1)$$

式中： $k_p$ —比例系数， $k_l$ —积分系数。

由图 3 可知，电压偏差调整控制器离散表达式为：

$$B_V = k'_p U_e(k) + k'_l \sum_{i=0}^k U_e(i) \quad (2)$$

式中： $B_V$ —电压控制器中输出的导纳值； $U_e(k) = U_{ref}(k) + U_{SL}(k) - U_{rms}(k)$ ；其中引入一个增益调节因

子  $\rho(k)$  对参数  $k'_p$ 、 $k'_l$  为进行优化处理，且：

$$k'_p(k) = k_{p0}(1 + k_1 |\rho(k)|) \quad (3)$$

$$k'_l(k) = k_{l0}(0.5 + k_2 \rho(k)) \quad (4)$$

式中： $k_{p0}$ 、 $k_{l0}$ —由 Ziegler-Nichols 算法优化得到的控制器参数，其中：

$$k_{p0} = 0.45k_u \quad (5)$$

$$k_{l0} = k_{p0} \Delta t / T_l \quad (6)$$

$$T_l = 0.833t_u \quad (7)$$

式中： $k_u$ — $k_p$  的临界状态值； $t_u$ —振荡周期； $\Delta t$ —采样间隔； $k_1$ 、 $k_2$ —正常数，主要作用是对  $k'_p$ 、 $k'_l$  的值进行

调整; $\rho(k)$ —增益调节因子,有:

$$\rho(k) = U_{eN}(k) \times \Delta U_{eN}(k) \quad (8)$$

其中:

$$U_{eN}(k) = U_e(k) / (|U_{ref}(k)| + |U_{SL}(k)|) \quad (9)$$

为电压误差  $U_e(k)$  的归一化值,且:

$$\Delta U_{eN}(k) = U_{eN}(k) - U_{eN}(k-1) \quad (10)$$

由上述过程能够求出使系统电压稳定时所需要的导纳值。

## 2 配电网系统不平衡补偿

SVC 无功补偿系统的拓扑结构如图 4 所示。

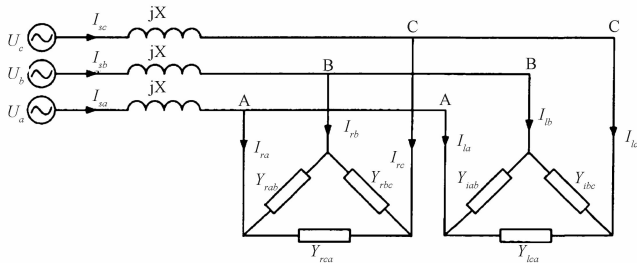


图 4 SVC 无功补偿系统的拓扑结构

$Y_{lab}, Y_{lbc}, Y_{lca}$ —各相负载的导纳; $Y_{rab}, Y_{rbc}, Y_{rca}$ —SVC 无功补偿器的补偿导纳; $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ —各相电流; $I_{la}, I_{lb}, I_{lc}$ —三相的负载电流; $I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$ —各相的静止无功补偿电流

由图 4 可得到各相的负载电流为:

$$\begin{cases} I_{la}^g = I_{AB}^g - I_{CA}^g = [Y_{lab}(1 - \alpha^2) - Y_{lca}(\alpha - 1)]U \\ I_{lb}^g = I_{BC}^g - I_{AB}^g = [Y_{lbc}(\alpha^2 - \alpha) - Y_{lab}(1 - \alpha^2)]U \\ I_{lc}^g = I_{CA}^g - I_{BC}^g = [Y_{lca}(\alpha - 1) - Y_{lbc}(\alpha^2 - \alpha)]U \end{cases} \quad (11)$$

将不平衡的负载电流进行分解:

$$\begin{cases} I_{l+}^g = \frac{1}{3}(I_{la}^g + \alpha I_{lb}^g + \alpha^2 I_{lc}^g) \\ I_{l-}^g = \frac{1}{3}(I_{la}^g + \alpha^2 I_{lb}^g + \alpha I_{lc}^g) \\ I_{l0}^g = \frac{1}{3}(I_{la}^g + I_{lb}^g + I_{lc}^g) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $I_{l+}^g, I_{l-}^g, I_{l0}^g$ —电流的正序、负序、零序的分量。

将式(11)代入式(12)中可得:

$$\begin{cases} I_{l+}^g = \frac{1}{3}(Y_{lab} + Y_{lbc} + Y_{lca})U \\ I_{l-}^g = -(\alpha^2 Y_{lab} + Y_{lbc} + \alpha Y_{lca}) \\ I_{l0}^g = 0 \end{cases} \quad (13)$$

将三相中负载导纳进行分解,得到电导和电纳为:

$$\begin{cases} Y_{lab} = G_{lab} + jB_{lab} \\ Y_{lbc} = G_{lbc} + jB_{lbc} \\ Y_{lca} = G_{lca} + jB_{lca} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $G_{lab}, G_{lbc}, G_{lca}$ —各相负载电导; $B_{lab}, B_{lbc}, B_{lca}$ —各相负载电纳。

由式(13)和式(14)可得:

$$\begin{cases} I_{l+}^g = U[(G_{lab} + G_{lbc} + G_{lca}) + j(B_{lab} + B_{lbc} + B_{lca})] \\ I_{l-}^g = U\left[\left(\frac{1}{2}G_{lab} - \frac{\sqrt{3}}{2}B_{lab} - G_{lbc} + \frac{1}{2}G_{lca} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{lca}\right) + j\left(\frac{1}{2}B_{lab} + \frac{\sqrt{3}}{2}G_{lab} - B_{lbc} - \frac{\sqrt{3}}{2}G_{lca} + \frac{1}{2}B_{lca}\right)\right] \\ I_{l0}^g = 0 \end{cases} \quad (15)$$

与负载电流分解类似,将三相 SVC 补偿电流分解为:

$$\begin{cases} I_{r+}^g = U[j(B_{rab} + B_{rbc} + B_{rca})] \\ I_{r-}^g = U\left[-\frac{\sqrt{3}}{2}B_{rab} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{rca}\right] + j\left(\frac{1}{2}B_{rab} - B_{rbc} + \frac{1}{2}B_{rca}\right) \\ I_{r0}^g = 0 \end{cases} \quad (16)$$

在对三相不对称负荷进行平衡化补偿,需要满足补偿后的电网负序分量的实部、虚部以及正序分量虚部为 0:

$$\text{Re}(I_{l-}^g + I_{r-}^g) = 0 \quad (17)$$

$$\text{Im}(I_{l-}^g + I_{r-}^g) = 0 \quad (18)$$

$$\text{Im}(I_{l+}^g + I_{r+}^g) = 0 \quad (19)$$

为了得到便于工程应用的实用公式,以 A 相为例:

$$\begin{cases} \text{Im} I_{la+}^g + \text{Im} I_{ra+}^g = 0 \\ \text{Re} I_{la-}^g + \text{Re} I_{ra-}^g = 0 \\ \text{Im} I_{la-}^g + \text{Im} I_{ra-}^g = 0 \end{cases} \quad (20)$$

将式(17)代入到式(20)中,可以得到实用的导纳计算公式为:

$$\begin{cases} B_{rab} = -(\text{Im} I_{la+}^g - \sqrt{3}\text{Re} I_{la-}^g + \text{Im} I_{la-}^g)/(3U) \\ B_{rbc} = -(\text{Im} I_{la+}^g - 2\text{Im} I_{la-}^g)/(3U) \\ B_{rca} = -(\text{Im} I_{la+}^g + \sqrt{3}\text{Re} I_{la-}^g + \text{Im} I_{la-}^g)/(3U) \end{cases} \quad (21)$$

由上式可以看出,如果能够得到电流正序分量的虚部、负序分量的实部和虚部以及电压的正序有效值,则可得到所需补偿的三相电纳值。

### 3 虚拟对称三相系统的同步旋转坐标变换的电纳计算

以图 5 中以 A 相为例,构造虚拟的三相电压为:

$$u_a = U_{am} \sin(\omega t + \varphi) \quad (22)$$

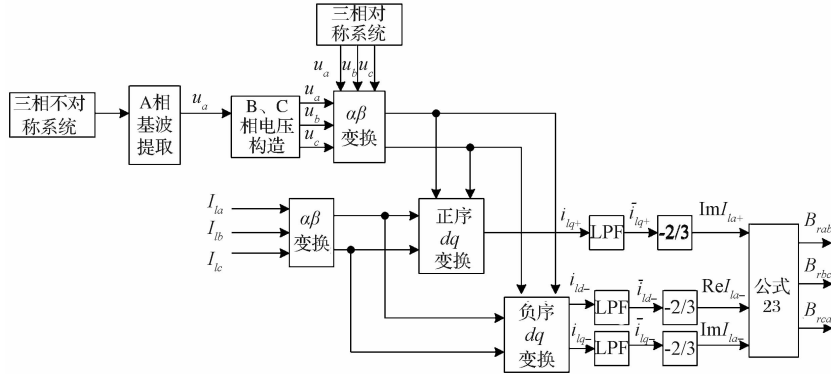


图 5 SVC 补偿电纳算法实现框图

由图 5 可得正序基波电流矢量在电压矢量下投影同步电流为:

$$\begin{bmatrix} i_{ld+} \\ i_{lq+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \\ -\frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} u_\alpha + i_{l\beta} u_\beta \\ i_{l\alpha} u_\alpha + i_{l\beta} u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld+} + \hat{i}_{ld+} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

同理可以得到负序基波电流矢量在电压矢量下投影同步电流为:

$$\begin{bmatrix} i_{ld-} \\ i_{lq-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{-u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \\ \frac{u_\beta}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} & \frac{u_\alpha}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} u_\alpha + i_{l\beta} u_\beta \\ i_{l\alpha} u_\alpha + i_{l\beta} u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld-} + \hat{i}_{ld-} \\ \bar{i}_{lq-} + \hat{i}_{lq-} \end{bmatrix} \quad (26)$$

将  $d$  轴、 $q$  轴分别视为复数坐标系中的实轴和虚轴,则可得:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{ld+} \\ \bar{i}_{lq+} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_1 \cos\theta_1 \\ -I_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix}$$

$$u_c = -U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 60^\circ) = U_{am} \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (23)$$

$$u_b = -u_a - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (24)$$

式中:  $U_{am}$ —A 相电压幅值,  $\varphi$ —初相角。

SVC 补偿电纳算法实现框图如图 5 所示。

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{ld-} \\ \bar{i}_{lq-} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I'_1 \cos\theta_2 \\ -I'_1 \sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

进一步可得:

$$\text{Re}I_{la-} = I'_1 \cos\theta_1 = \frac{2}{3} \bar{i}_{ld-}$$

$$\text{Im}I_{la+} = I_1 \sin\theta_1 = \frac{-2}{3} \bar{i}_{lq+}$$

$$\text{Im}I_{la-} = I'_1 \sin\theta_2 = \frac{-2}{3} \bar{i}_{lq-} \quad (28)$$

式中:  $I_1, I'_1$ —基波正序分量和负序分量。

### 4 仿真分析

在三相电压不对称情况下,笔者对本研究所提出的控制方法进行仿真分析,仿真电路如图 6 所示。

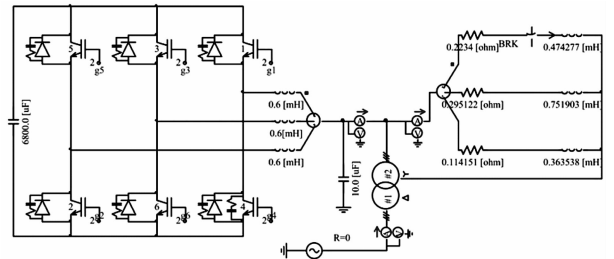


图 6 仿真系统电路图

仿真参数为:电源电压采用 AC10kV/50Hz,TCR 最大容量为 10 Mvar,MSC 最大容量为 10 Mvar。电压偏差控制器参数  $k_1 = 0.8, k_2 = 30$ 。

补偿前后负荷电流波形如图 7 所示。

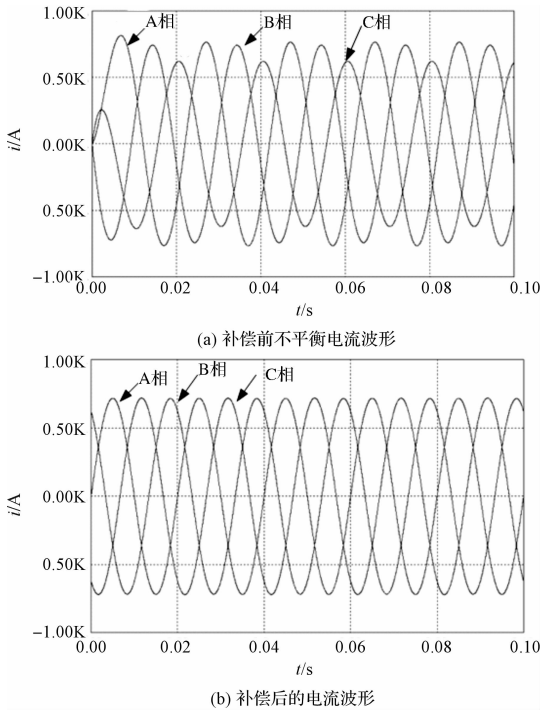


图 7 补偿前后负荷电流波形

如图 7(a) 所示,检测负荷不平衡电流 A、B、C 三相分别为 468.61 A、357.94 A、413.75 A;图 7(b) 为补偿后的三相电流波形,此时补偿后的 A、B、C 的三相分别为 415.31 A、412.51 A、413.75 A。不平衡率由 15.43% 降到了 0.65%。

电压补偿波形图如图 8 所示。

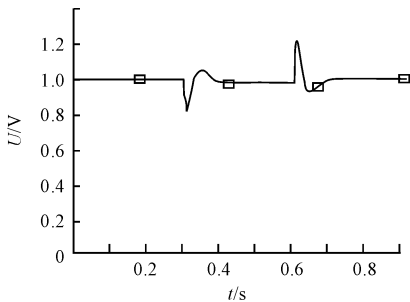


图 8 公共连接点电压波形

在 0.2 s 时刻由于负荷的波动使公共连接点三相电压发生跌落,在 0.4 s 进行补偿后,0.7 s 时刻电压稳定到原来的水平。由此可见,本研究所提出的补偿方法响应速度快,电压稳定效果明显。

### 5 结束语

本研究针对配电网中电压不稳定等电能质量问

题,介绍了一种 TCR + MSC 型的静止无功补偿拓扑结构,提出了一种将 SVC 电压偏差控制和 SVC 负荷不平衡补偿相结合的控制方法。笔者采用 Ziegler-Nichols 方法对 SVC 中电压控制器中参数进行优化。通过虚拟对称三相系统的同步参考旋转坐标变换的补偿电纳的计算方法,对三相负荷的不平衡进行了补偿。仿真结果说明所提方法实现简单,运用灵活且具有良好的动态响应速度及跟踪性能,能够很好地实现负荷电流负序分量的补偿,显著提升了电网电能质量。

### 参考文献 (References) :

- [1] 盘宏斌,罗安,赵伟.基于 DSP 的不平衡补偿和单纯形优化的静止无功补偿器[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):51-55.
- [2] 单任仲,尹忠东,肖湘宁,等.新型正弦脉宽调制控制电压源型动态静止无功补偿器[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):95-99.
- [3] YANG Hua-yun, REN Shi-yan. A practical series shunt hybrid active power filter based on fundamental magnetic potential self-balance[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**,2008,23(4):2089-2096.
- [4] 刘聪,戴珂,张树全,等. RDFT 算法在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):96-100.
- [5] LUO An, SHUAI Zhi-kang, ZHU Wen-ji, et al. Combined system for harmonic suppression and reactive power compensation[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009,56(2):418-427.
- [6] 刘玉雷,解大,张延尺. 静止无功补偿器用于抑制厂用电系统电压波动仿真[J]. 电力系统自动化,2006,30(16):97-101.
- [7] 周杨,江道灼,王玉芬. 基于虚拟磁链的静止同步补偿器直接功率控制策略研究[J]. 电网技术,2012,36(11):205-210.
- [8] 李想,赵强松. 基于 DSTATCOM 的点焊机无功功率补偿研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):149-153.
- [9] 吴敬兵. 企业配电网电能质量检测及控制方法研究[D]. 湖南:湖南大学电气与信息工程学院 2011.
- [10] 丁仁杰,刘健,赵玉伟,等. 不平衡电路的瞬时功率分析及不对称负荷补偿方法[J]. 电工技术学报,2007,22(1):120-124.
- [11] MUDI R K, DEY C, LEE T T. An improved auto-tuning scheme for PI controllers[J]. **Transactions of International Society of Automation**,2008,47(1):45-52.
- [12] AKAGI H, HATADA T. Voltage balancing control for a three-level diode-clamped converter in a medium-voltage transformerless hybrid active filter[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2009,24(3):571-579.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

李润秋,朱岸明,王中阳,等. 电压偏差及负荷不平衡补偿的静止无功补偿器控制方法[J]. 机电工程,2016,33(10):1258-1262.

LI Run-qiu, ZHU An-ming, WANG Zhong-yang, et al. Voltage deviation and load unbalance compensation control method of static var compensator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(10):1258-1262.