

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.019

基于Steinmetz原理与瞬时无功理论的 SVC装置防过补偿控制策略*

孙 聪,王异凡,陈国柱*,吴新科
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要: 针对配电网中无功功率过补偿问题,在研究当前不平衡负荷补偿原理及补偿算法的基础上,通过改进Steinmetz理论,推导出了一种包含功率因数参数的补偿导纳算法。利用瞬时无功理论求得了该补偿导纳算法的实用公式,以该算法作为静止无功补偿装置(SVC)的控制策略,可以快速准确地平衡三相有功功率,将负荷补偿到指定功率因数,有效地防止了过补偿造成无功功率倒送。在Matlab电力系统仿真环境下进行了仿真试验。仿真结果表明,该算法具有较高的精度和动态响应速度。

关键词: 静止无功补偿装置;瞬时无功理论;不平衡补偿;功率因数可调

中图分类号: TM761

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1246-05

Anti-overcompensation control strategy in SVC based on steinmetz principle and instantaneous reactive power theory

SUN Cong, WANG Yi-fan, CHEN Guo-zhu, WU Xin-ke
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of reactive power overcompensation in the distribution network, a new compensation algorithm in which the power factor can be set randomly was deduced after studying current principles for unbalanced load compensation and modifying the compensation conditions of the Steinmetz principle. The algorithm supported by instantaneous reactive power theory, derives the general formula of compensatory admittance. It can be used as the control strategy of static var compensator (SVC) to balance the three-phase active power; compensate loads to specified power factor and effectively prevent reactive power feeding inversely caused by overcompensation. Simulation was carried out in the Matlab power system simulation environment. The results indicate that the proposed algorithm has high precision and good dynamic characteristics.

Key words: static var compensator(SVC); instantaneous reactive power theory; unbalance compensation; adjustable power factor

0 引 言

近年来,随着电力工业的高速发展,人们对供电质量的要求越来越高。而由于配电网中电弧炉、轧钢机和电气化铁路等大容量冲击性不对称负荷的广泛使用,将产生快速波动的负序电流,并流入各处电力系统,引起供电系统公共连接点电压严重不对称、波动和

闪变等电能质量问题^[1-3]。“在负荷接入点安装补偿装置,用以平衡负序电流”是目前广泛应用的方法^[4]。其中,固定电容器(FC)+晶闸管可控电抗器(TCR)型SVC装置以其容量大、性价比高等优点而在配电网中广泛使用。

针对运用SVC装置补偿不平衡负荷,很多学者进行了深入研究^[5-8],其在平衡三相负荷的同时将功率因

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177147);浙江省重点科技创新团队资助项目(2010R50021)

作者简介: 孙 聪(1986-),男,山东枣庄人,主要从事无功功率补偿技术方面的研究。E-mail: wizardwitch@163.com

通信联系人: 陈国柱,男,博士,教授,博士生导师。E-mail: gzchen@zju.edu.cn

数补偿到1,即实现完全补偿。一般情况下由于信号采集,处理,传输中的偏差,若以完全补偿作为控制目标,很容易造成过补偿,从而对电网设备构成安全隐患。因此SVC装置最合理的补偿效果应该是将功率因数调节到0.9~0.95之间,这样降低线损的经济效益最优,同时防止了无功功率倒送^[9]。

本研究在Steinmetz理论的基础上,通过对补偿条件进行改进,实现将负载平衡化补偿到指定功率因数的目标,从而有效地防止过补偿。同时利用瞬时无功理论推导出实用的补偿导纳公式。

1 传统的Steinmetz理论

丹麦学者C.P.Steinmetz提出的无功补偿理论适用于三相三线制负荷的平衡化补偿,补偿等效电路如图1所示。其基本思想是:利用对称分量法将三相不平衡负荷电流基波分量分解为正序分量 $\dot{I}_{L1+}$ 与负序分量 $\dot{I}_{L1-}$,然后调节SVC装置的补偿电纳使补偿电流的基波正序分量 $\dot{I}_{1+}^{(c)}$ 和负序分量 $\dot{I}_{1-}^{(c)}$ 满足式(1)。因此传统Steinmetz理论的控制目标是严格地调整功率因数为1,系统不平衡度为0^[10]。

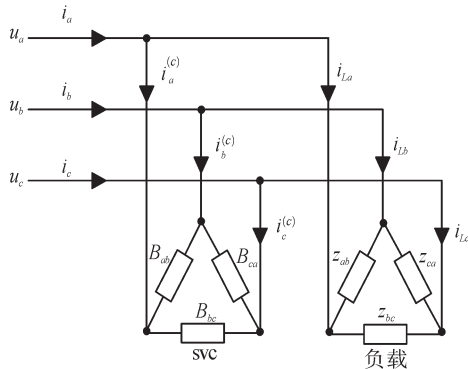


图1 负载补偿型SVC等效电路

$$\begin{cases} \operatorname{Im}[\dot{I}_{L1+} + \dot{I}_{1+}^{(c)}] = 0 \\ \dot{I}_{L1-} + \dot{I}_{1-}^{(c)} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2 经济合理的补偿功率因数

文献[9]运用等网损微增率的概念推导出了10.5 kV配电网中投资补偿效果示意图,如图2所示。在欠补范围内,随着补偿容量的提高,线损降低。但由零补偿到完全补偿的过程中,曲线斜率越来越小,说明网损的减小越来越不显著。所以在实际工程应用中,最合理的补偿效果应该是将功率因数控制在0.9~0.95之间。

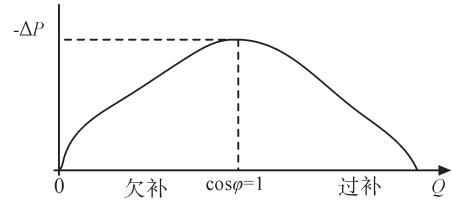


图2 线损改善效果图

3 功率因数可调的Steinmetz算法

无论是从防止过补偿的角度还是从降低线损率的经济效益方面,都没有必要将功率因数补偿到1。通过改进Steinmetz负载平衡化补偿理论中的补偿条件,在补偿导纳公式中加入功率因数这一控制参量,不仅能有效抑制过补偿,达到最佳经济效益,而且可实现在功率因数闭环控制策略下对功率因数精确跟踪。在此,本研究推导出包含功率因数参变量的补偿导纳公式。

图1中,SVC接入点母线基波电压正序分量表示为:

$$\begin{cases} u_{a1+} = \sqrt{2}U_{1+} \cos(\omega t) \\ u_{b1+} = \sqrt{2}U_{1+} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_{c1+} = \sqrt{2}U_{1+} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{1+} —母线基波相电压正序分量有效值。

负荷基波电流 i_{La1} 、 i_{Lb1} 、 i_{Lc1} 应用对称分量法分解为正序分量 i_{La1+} 、 i_{Lb1+} 、 i_{Lc1+} ,负序分量 i_{La1-} 、 i_{Lb1-} 、 i_{Lc1-} ,用瞬时值表示为:

$$\begin{cases} i_{La1+} = \sqrt{2}I_{L1+} \cos(\omega t + \varphi_{L1+}) \\ i_{Lb1+} = \sqrt{2}I_{L1+} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{L1+}) \\ i_{Lc1+} = \sqrt{2}I_{L1+} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{L1+}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} i_{La1-} = \sqrt{2}I_{L1-} \cos(\omega t + \varphi_{L1-}) \\ i_{Lb1-} = \sqrt{2}I_{L1-} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{L1-}) \\ i_{Lc1-} = \sqrt{2}I_{L1-} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{L1-}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{L1+} —负荷基波电流正序分量有效值; φ_{L1+} —负荷基波电流正序分量初相角; I_{L1-} —负荷基波电流负序分量有效值; φ_{L1-} —负荷基波电流负序分量初相角。

将SVC补偿电流基波成分: $i_{a1}^{(c)}$ 、 $i_{b1}^{(c)}$ 、 $i_{c1}^{(c)}$,利用对称分量法分解为正序分量: $i_{a1+}^{(c)}$ 、 $i_{b1+}^{(c)}$ 、 $i_{c1+}^{(c)}$,负序分量: $i_{a1-}^{(c)}$ 、 $i_{b1-}^{(c)}$ 、 $i_{c1-}^{(c)}$ 。

若补偿后等效负载的功率因数为 λ ,则补偿后a相母线基波电流正序分量为:

$$i_{a1+} = \sqrt{2}I_{a1+} \cos(\omega t - \varphi_{a1+}) \quad (5)$$

式中: $\lambda = \cos \varphi_{a1+}$; I_{a1+} —母线基波电流正序分量有效值。

由式(5)结合式(3)得补偿电流基波正序分量为:

$$\begin{cases} i_{a1+}^{(c)} = \sqrt{2} I_{L1+} (\kappa \cos \varphi_{L1+} + \sin \varphi_{L1+}) \sin(\omega t) \\ i_{b1+}^{(c)} = \sqrt{2} I_{L1+} (\kappa \cos \varphi_{L1+} + \sin \varphi_{L1+}) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{c1+}^{(c)} = \sqrt{2} I_{L1+} (\kappa \cos \varphi_{L1+} + \sin \varphi_{L1+}) \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\kappa = \sqrt{1 - \lambda^2} / \lambda$ 。

为实现三相不平衡度为0的目标,补偿电流基波负序分量与负载电流基波负序分量之和应为0,即:

$$\begin{cases} i_{a1-}^{(c)} + i_{La1-} = 0 \\ i_{b1-}^{(c)} + i_{Lb1-} = 0 \\ i_{c1-}^{(c)} + i_{Lc1-} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(2,6,7),并利用叠加定理,求得SVC装置各相补偿电纳为:

$$\begin{cases} B_{ab}^{(c)} = -\frac{1}{3U_{1+}} (\kappa I_{L1+} \cos \varphi_{L1+} + I_{L1+} \sin \varphi_{L1+} - \sqrt{3} I_{L1-} \cos \varphi_{L1-} + I_{L1-} \sin \varphi_{L1-}) \\ B_{bc}^{(c)} = -\frac{1}{3U_{1+}} (\kappa I_{L1+} \cos \varphi_{L1+} + I_{L1+} \sin \varphi_{L1+} - 2I_{L1-} \sin \varphi_{L1-}) \\ B_{ca}^{(c)} = -\frac{1}{3U_{1+}} (\kappa I_{L1+} \cos \varphi_{L1+} + I_{L1+} \sin \varphi_{L1+} + \sqrt{3} I_{L1-} \cos \varphi_{L1-} + I_{L1-} \sin \varphi_{L1-}) \end{cases} \quad (8)$$

4 基于瞬时无功理论的补偿导纳实用算法

式(8)中补偿导纳公式由母线基波电压正序分量、基波电流正序有功分量与无功分量、基波电流负序有功分量与无功分量给出,若采用传统的相量理论则至少需要采集一个周期的信号进行计算,使得SVC装置调节时间过长,动态特性较差。利用瞬时无功功率理论中的 i_p 、 i_q 运算法,可以快速推导出以上各参量,进而求得实用补偿导纳公式。其计算框图如图3所示。

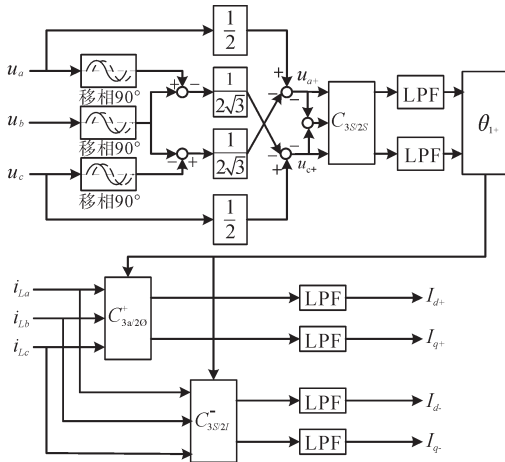


图3 基于瞬时无功理论的补偿导纳算法框图

4.1 母线电压矢量定向

母线电压矢量定向实质是实时地计算 $\dot{U}$ 的相角和幅值,前者用于同步旋转坐标变换,后者用于补偿导纳计算。为了消除母线电压不平衡以及谐波的影响,本研究运用对称分量法从母线电压中提取出其正序分量: u_{a+} 、 u_{b+} 、 u_{c+} ,如下式所示^[11]:

$$\begin{pmatrix} u_{a+} \\ u_{b+} \\ u_{c+} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} u_a + \frac{j}{2\sqrt{3}} (u_b - u_c) \\ -(u_a + u_{c+}) \\ \frac{1}{2} u_c + \frac{j}{2\sqrt{3}} (u_a - u_b) \end{pmatrix} \quad (9)$$

运用CLARK变换,将 u_{a+} 、 u_{b+} 、 u_{c+} 由三相静止坐标系变换到两相静止坐标系中得到 $u_{\alpha1+}$ 、 $u_{\beta1+}$,如下式所示:

$$\begin{pmatrix} u_{\alpha1+} \\ u_{\beta1+} \end{pmatrix} = C_{3s/2s} \begin{pmatrix} u_{a+} \\ u_{b+} \\ u_{c+} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

经过低通滤波滤除谐波分量 $u'_{\alpha+}$ 、 $u'_{\beta+}$ 后,求得基波电压正序分量的 α 轴分量 $u_{\alpha1+}$ 、 β 轴分量 $u_{\beta1+}$,其矢量关系如图4所示。

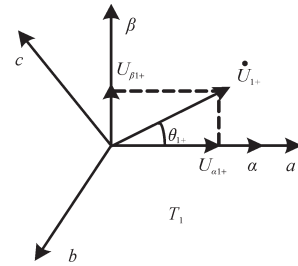


图4 α - β 坐标系中电压基波正序矢量

笔者取旋转坐标系 d 轴与母线基波电压正序分量 $\dot{U}_{1+}$ 同相,即 $\theta_{1+} = \omega t$ 。则基于母线电压定向的正序、负序同步旋转变换式分别表示为:

$$C_{3s/2\phi}^+ = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_{1+} & \cos(\theta_{1+} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{1+} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_{1+} & -\sin(\theta_{1+} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{1+} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_{3s/2\phi}^- = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_{1+} & \cos(\theta_{1+} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{1+} - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_{1+} & -\sin(\theta_{1+} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{1+} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

同时,式(11)为恒功率变换,变换后电压幅值增大 $\sqrt{3/2}$ 倍,因此母线电压基波正序分量有效值为:

$$U_{1+} = \sqrt{\frac{2}{3}(U_{\alpha 1+}^2 + U_{\beta 1+}^2)} \quad (14)$$

4.2 负载电流坐标变换

母线电压矢量定向得到了电压基波正序分量同步信号的相角和角速度,本研究以此为基准将三相负载电流信号转换到正序同步旋转坐标系和负序同步旋转坐标系,从而可以方便地得到基波电流正序有功分量与无功分量、基波电流负序有功分量、无功分量。

本研究对负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 按式(12)进行正序同步旋转变换。其基波正序分量见式(3),变换为直流量 I_{d+} 、 I_{q+} ,其他成分变换为交流量 I'_{d+} 、 I'_{q+} ,如式(15)及图5(a)所示。

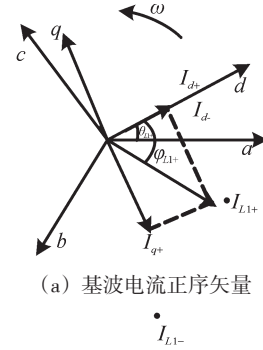
$$\begin{pmatrix} I_{d+} + I'_{d+} \\ I_{q+} + I'_{q+} \end{pmatrix} = C_{3s/2\phi}^+ \begin{pmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3} I_{L1+} \cos \varphi_{L1+} + I'_{d+} \\ -\sqrt{3} I_{L1+} \sin \varphi_{L1+} + I'_{q+} \end{pmatrix} \quad (15)$$

本研究对负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 按式(13)进行负序同步旋转变换。其基波负序分量见式(4),变换为直流量 I_{d-} 、 I_{q-} ,其他成分变换为交流量 I'_{d-} 、 I'_{q-} ,如式(16)及图5(b)所示。

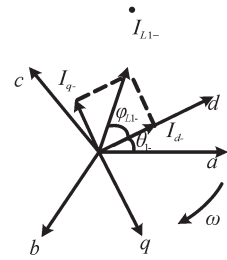
$$\begin{pmatrix} I_{d-} + I'_{d-} \\ I_{q-} + I'_{q-} \end{pmatrix} = C_{3s/2\phi}^- \begin{pmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{3} I_{L1-} \cos \varphi_{L1-} + I'_{d-} \\ -\sqrt{3} I_{L1-} \sin \varphi_{L1-} + I'_{q-} \end{pmatrix} \quad (16)$$

同步旋转变换后的负载电流信号经过低通滤波得到直流量,代入式(8)中,可得到包含功率因数变量的实用补偿导纳式如下:

$$\begin{cases} B_{ab}^{(c)} = -\frac{\sqrt{3}}{9U_{1+}}(\kappa I_{d+} - I_{q+} - \sqrt{3} I_{d-} - I_{q-}) \\ B_{bc}^{(c)} = -\frac{\sqrt{3}}{9U_{1+}}(\kappa I_{d+} - I_{q+} + 2I_{q-}) \\ B_{ca}^{(c)} = -\frac{\sqrt{3}}{9U_{1+}}(\kappa I_{d+} - I_{q+} + \sqrt{3} I_{d-} - I_{q-}) \end{cases} \quad (17)$$



(a) 基波电流正序矢量



(b) 基波电流负序矢量

图5 同步旋转坐标系中的基波电流矢量

5 仿真实验

为验证本研究推导的控制算法的有效性,笔者在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建 10.5 kV 三相三线制不平衡负荷仿真模型,如图6所示。仿真参数如下:母线电压 10.5 kV,系统阻抗 $0.21 + j1.16 \Omega$,SVC 容量 ± 6 Mvar,TCR 支路采用三角形连接,FC 支路采用星型连接,两组不平衡负荷容量如表1所示。

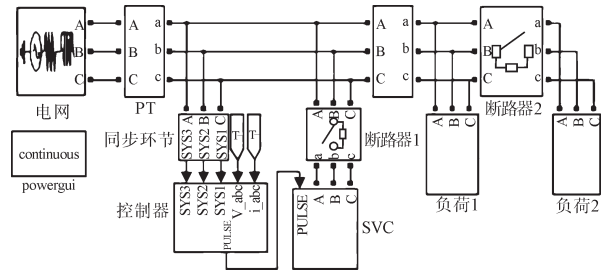


图6 SVC补偿不平衡负荷仿真模型

表1 两组不平衡负荷容量 (单位:MW/Mvar)

负荷	P_a	Q_a	P_b	Q_b	P_c	Q_c
负荷1	0.62	0.65	0.37	0.57	0.27	0.30
负荷2	0.51	0.44	0.72	0.80	0.21	0.29

本研究分别将补偿后功率因数设置为0.9、0.95进行仿真。仿真开始时系统负荷为第1组不平衡负荷,0.1 s时SVC装置投入,0.25 s时第二组不平衡负荷投入。仿真结果如图7所示。补偿后各相功率值如表2、表3所示。由仿真波形及数据可见,采用该算法的SVC装置在装置投入及负荷突变两种工况下不但能平衡三相有功功率,补偿负荷到指定功率因数,而且还具有较高的动态响应速度。

(下转第1272页)

and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335-1340.

- [2] NOMURA Y, SAGARA M, NARUSE H, et al. Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1992, 14(11): 1095-1099.
- [3] 廖士中, 高培焕, 苏 艺, 等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5A(7): 593-596.
- [4] BASU A. Alternative models for fish-eye lenses[J]. **Pattern Recognition Letters**, 1995, 16(4): 433-441.
- [5] 汪嘉业, 杨兴强, 张彩明. 基于鱼眼镜头拍摄的图像生成漫游模型[J]. 系统仿真学报, 2001(13): 66-68.
- [6] 张 诚, 汪嘉业. 利用鱼眼照片恢复景物的深度信息[J].

工程图学学报, 2002(3): 71-84.

- [7] KEDZIERSKI M, FRYSKOWSKA A. Precise method of fisheye lens calibration[C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. China: [s.n.], 2008: 765-768.
- [8] WANG J, SHI F, ZHANG J, et al. A new calibration model of camera lens distortion[J]. **Pattern Recognition**, 2008, 41(2): 607-615.
- [9] 陈晃明, 陈向颖. 鱼眼镜头光学设计[J]. 北京理工大学学报, 1989, 9(12): 35-42.
- [10] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1249 页)

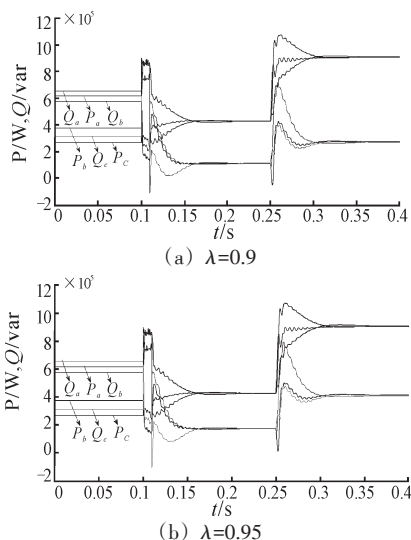


图7 SVC装置补偿效果图

表2 SVC投入后各相功率值 (单位: MW/Mvar)

λ 给定值	p_a	Q_a	P_b	Q_b	P_c	Q_c
$\lambda=0.9$	0.413	0.195	0.417	0.197	0.414	0.193
$\lambda=0.95$	0.415	0.131	0.420	0.134	0.417	0.133

响应时间: 56 ms

表3 第2组负荷投入后各相功率值 (单位: MW/Mvar)

λ 给定值	p_a	Q_a	P_b	Q_b	P_c	Q_c
$\lambda=0.9$	0.901	0.422	0.898	0.421	0.902	0.423
$\lambda=0.95$	0.897	0.282	0.901	0.283	0.903	0.285

响应时间: 56 ms

6 结束语

本研究通过改进 Steinmetz 算法, 针对三相不平衡负荷推导出包含功率因数参变量的补偿导纳算法。笔者在电网电压矢量定向的基础上, 对负荷电流运用对称分量法及选用正序、负序同步旋转坐标变换, 通过低通滤波器滤除其交流分量, 求得用直流量表示的

负载电流基波分量(正序和负序), 以此为基础得到实用的补偿导纳公式。笔者通过 Matlab/Simulink 仿真实验验证了上述补偿导纳算法的正确性、有效性, 采用该算法的 SVC 装置具有较快的响应速度和较高的补偿精度, 防止了无功功率过补偿, 在维持系统稳定的同时降低了配电网电能损耗。

参考文献 (References):

- [1] 刘小河, 赵 刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 30-34.
- [2] 袁佳歆, 李士杰, 张晨萌, 等. 电气化铁路三相不平衡协同补偿[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 218-223.
- [3] 杨 昆, 陈 磊, 陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 36-41.
- [4] 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.
- [5] 胡应宏, 王建勋, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-104.
- [6] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林. 不平衡负载情况下基于双序 dq 坐标系双级矩阵变换器的闭环控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 70-75.
- [7] 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.
- [8] 丁仁杰, 刘 健, 张 隽, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的 SVC 控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 47-51.
- [9] 戴晓亮. 无功补偿技术在配电网中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 11-14.
- [10] 李 鹏, 石新春, 梁志瑞, 等. 对电弧炉平衡化补偿实用公式推导及验证[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 77-80.
- [11] LEE S, KANG J, SUL S. A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system[C]// IEEE-IAS Annu. Meeting. Phoenix: [s.n.], 1999: 2167-2172.

[编辑: 洪炜娜]