

新型不对称负荷补偿装置控制研究

蔡阳, 韦钢, 雷振

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 针对电力系统不对称负荷日益多样性的状况, 将瞬时无功功率理论应用于提高功率因数和补偿三相不平衡的静止无功功率补偿装置 (Static Var Compensator) 控制之中, 提出了一种基于新算法的 SVC 补偿控制方法。该算法以对称分量法为理论支撑, 通过对负荷电流进行基波有功分量和无功分量的解耦, 利用分离出的无功电流计算理想补偿导纳, 简化了传统的不对称补偿算法。采用 Matlab/Simulink 对所提出的控制算法进行仿真建模, 建立对晶闸管相控电抗器 (TCR) 并联电容型 SVC 的控制, 仿真结果证明了所提方法的正确性和可行性。

关键词: 不对称负荷; 瞬时无功; 功率因数; SVC; 补偿算法; 无功电流

Research on new type of asymmetric load compensator control strategy

CAI Yang, WEI Gang, LEI Zhen

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper proposes a SVC compensation algorithm based on the new control methods aiming at the growing diversity of asymmetric load conditions, through applying the theory of instantaneous reactive power to static reactive power compensation equipment (Static Var Compensator) control that is used to increase power factor and compensate unbalanced three-phase. Based on symmetrical component method, through the load current decoupling into active component and reactive component, and by the use of the isolated reactive current to calculate the ideal compensation susceptance, the proposed algorithm simplifies the traditional asymmetric compensation algorithm. At last, the proposed control algorithm is simulated and modelled using Matlab/simulink, and the control for SVC is established. The correctness and feasibility of the proposed scheme are verified by simulating results.

Key words: asymmetric load; instantaneous reactive; power factor; SVC; compensation algorithm; reactive current

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0110-05

0 引言

随着我国经济水平的不断发展, 电力系统内出现了大量的不平衡负荷, 这些不平衡负荷产生的负序电流增加了系统电能的损失, 严重威胁着电力系统的安全和经济运行^[1-2]。在负荷接入点安装补偿装置, 用以平衡负序电流是目前比较广泛应用的方法。以晶闸管相控电抗器 (TCR) 为核心的 SVC 是目前国内外广泛使用的动态无功补偿装置。TCR 并联电容型 SVC, 除了可以校正功率因数、稳定系统电压外, 还可以补偿三相负荷的不平衡。

SVC 具有多种补偿算法, 以往理论和文献中一般采用两种方式计算所需的补偿导纳。第一种: 用有功或者无功功率平均值表示所要求的补偿导纳,

这种方法虽然对采样时刻没有特殊要求, 但是计算中的电压量, 电流量都是相量形式, 不易测量和实现。第二种: 用瞬时电流和电压求所需的补偿导纳, 用这种方法计算补偿导纳, 对抽样时间严格的要求, 必须是三相电压过零变正的时刻。文献[3]便是采用了一种基于功率平衡思想的以测量功率表示的补偿导纳算法, 但未考虑谐波的情况。文献[4-6]是基于瞬时无功理论, 采用电流瞬时值进行计算, 但算法复杂、精度不够高。

无论采用上述哪种控制算法, 对于电流、电压以及功率的检测总是实现控制算法的一个不可或缺的步骤, 目前主要存在以下一些检测方法。由 S.Fryze 提出的 Fryze 时域非正弦电流检测理论物理意义明确, 但其检测需要一定的延时。文献[7-8]在该理论的基础上探讨了三相系统无功的实时检测方法, 该方法只有在电压和电流都不含谐波成分时才

基金项目: 上海市重点学科项目资助 (J51301)

能实现实时检测, 其他情况下都需要一定周期的延时才能实现检测。基于平均功率理论^[9]的检测方法是后来出现的一种比较重要的电量检测法, 其定义明确, 但需构建复杂的模拟器件来实现, 实时性和精确度不高。国内还有许多基于瞬时无功率理论的实时电量检测方法^[10-11]的研究, 但对于其在电力系统不对称负荷方面中的应用较少。

本文通过对不平衡系统进行分析, 首次提出一种基于瞬时无功率理论的补偿导纳新算法, 比起之前的补偿导纳计算理论, 该方法具有简单性、快速性、准确性等特点, 并通过 Matlab/Simulink 仿真对该算法进行了验证及说明。

1 不平衡负荷补偿分析

1.1 理想补偿网络

斯坦米兹首先提出了理想补偿网络理论^[3], 图 1 (a) 所示为单相电阻负荷 R 。这是一个功率因数为 1, 三相不平衡的系统。而在图 1 (b) 中 bc、ca 两相分别加接电抗为 $j\omega L = j\sqrt{3}R$ 电感和电抗为 $\frac{1}{j\omega C} = -j\sqrt{3}R$ 的电容, 二者产生谐波可以构成平衡的三相系统^[4, 10]。

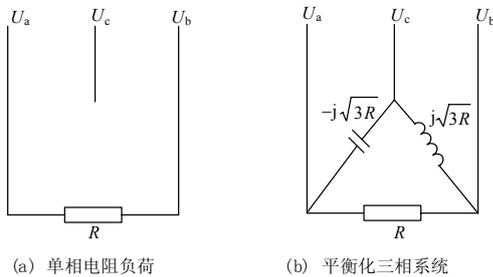


图1 从三相不平衡到三相平衡

Fig.1 From three-phase unbalanced to three-phase equilibrium

该平衡的三相系统的相量图如图 2 所示。电容电流 \dot{I}_{bc} 超前电压 \dot{V}_{bc} 90° , 电感电流 \dot{I}_{ca} 滞后电压 \dot{V}_{ca} 90° , 电感电流和电容电流均方根值相等, 恰能构成电感和电容谐振的条件。电阻电流 \dot{I}_{ab} 与 \dot{V}_{ab} 同相。由 $\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}$ 、 $\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}$ 和 $\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}$ 可以看出, 此时三相线电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 和 \dot{I}_c 的方均根值相等, 相互相位差为 120° 。故经上述平衡化电路可将不平衡的三相系统变换成平衡的三相系统^[12]。

由以上补偿原理可以求得补偿导纳为:

$$\begin{cases} B_\gamma^{ab} = -B_l^{ab} + (G_l^{ca} - G_l^{bc})/\sqrt{3} \\ B_\gamma^{bc} = -B_l^{bc} + (G_l^{ab} - G_l^{ca})/\sqrt{3} \\ B_\gamma^{ca} = -B_l^{ca} + (G_l^{bc} - G_l^{ab})/\sqrt{3} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 只能作为补偿原理的说明, 因为欲求的补偿器导纳是用负荷导纳来表示的, 而负荷的导纳却不像线电流和电压那么容易测量。

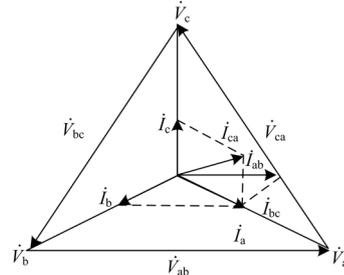


图2 平衡三相系统的相量图

Fig.2 The phase diagram of balanced three-phase system

1.2 SVC 补偿导纳的计算

T.J.E 米勒提出了用对称分量法分析负荷补偿。该方法根据补偿之后, 负序电流 $\dot{I}_{2(l)} + \dot{I}_{2(r)} = 0$ 和 $\text{Im}[\dot{I}_{1(l)} + \dot{I}_{1(r)}] = 0$ 这两个条件, 理想补偿器导纳便可使用式 (2) 表示:

$$\begin{cases} B_\gamma^{ab} = -\frac{1}{3U}[\text{Im}\dot{I}_{a(l)} + \text{Im}\alpha\dot{I}_{b(l)} - \text{Im}\alpha^2\dot{I}_{c(l)}] \\ B_\gamma^{bc} = -\frac{1}{3U}[\text{Im}\alpha\dot{I}_{b(l)} + \text{Im}\alpha^2\dot{I}_{c(l)} - \text{Im}\dot{I}_{a(l)}] \\ B_\gamma^{ca} = -\frac{1}{3U}[\text{Im}\alpha^2\dot{I}_{c(l)} + \text{Im}\dot{I}_{a(l)} - \text{Im}\alpha\dot{I}_{b(l)}] \end{cases} \quad (2)$$

本文基于以上理论基础提出基于瞬时无功电流的补偿导纳计算方法由瞬时无功功率理论可以把三相电流的有功成分和无功成分分解开来, 即三相电流可表示成:

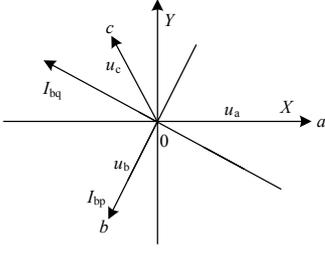
$$\begin{cases} \dot{i}_a = \dot{i}_{ap} + \dot{i}_{aq} \\ \dot{i}_b = \dot{i}_{bp} + \dot{i}_{bq} \\ \dot{i}_c = \dot{i}_{cp} + \dot{i}_{cq} \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 对各相有功、无功电流求均方根, 可得各相无功电流的有效值: I_{ap} 、 I_{bp} 、 I_{cp} 、 I_{aq} 、 I_{bq} 、 I_{cq} 。

因为一般无功为感性无功, 所以有:

$$\text{Re}\dot{I}_a = I_{ap}, \quad \text{Im}\dot{I}_a = -I_{aq} \quad (4)$$

I_{bp} 、 I_{bq} 与 $\text{Im}\dot{I}_b$ 、 $\text{Re}\dot{I}_b$ 的关系如图 3 所示。

图3 I_{bp} 、 I_{bq} 与 $\text{Im}\dot{I}_b$ 、 $\text{Re}\dot{I}_b$ 的关系图Fig.3 The connection of compensation of I_{bp} , I_{bq} and $\text{Im}\dot{I}_b$,

$$\text{Re}\dot{I}_b$$

$$\text{因此: } \text{Re}\dot{I}_b = -I_{bp} \cos 60^\circ - I_{bq} \cos 30^\circ$$

$$\text{Im}\dot{I}_b = -I_{bp} \sin 60^\circ + I_{bq} \sin 30^\circ \quad (5)$$

$$\text{同理: } \text{Re}\dot{I}_c = -I_{cp} \cos 60^\circ + I_{cq} \cos 30^\circ$$

$$\text{Im}\dot{I}_c = I_{cp} \sin 60^\circ + I_{cq} \sin 30^\circ \quad (6)$$

又因为三相电压对称, 所以由式(4)~(6)

可知:

$$\begin{cases} q_{a(l)} = I_{aq} \cdot U \\ q_{b(l)} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}I_{bp} + \frac{1}{2}I_{bq}\right) \cdot \frac{1}{2}U - \left(-\frac{1}{2}I_{bp} - \frac{\sqrt{3}}{2}I_{bq}\right) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}U \\ q_{c(l)} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}I_{cp} + \frac{1}{2}I_{cq}\right) \cdot \frac{1}{2}U + \left(-\frac{1}{2}I_{cp} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{cq}\right) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}U \end{cases} \quad (7)$$

式(7)经化简后可得:

$$\begin{cases} q_{a(l)} = I_{aq} \cdot U \\ q_{b(l)} = I_{bq} \cdot U \\ q_{c(l)} = I_{cq} \cdot U \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)中可以求得三相各自需要的补偿导纳:

$$\begin{cases} B_\gamma^{ab} = \frac{1}{3U}(I_{aq} + I_{bq} - I_{cq}) \\ B_\gamma^{bc} = \frac{1}{3U}(I_{bq} + I_{cq} - I_{aq}) \\ B_\gamma^{ca} = \frac{1}{3U}(I_{cq} + I_{aq} - I_{bq}) \end{cases} \quad (9)$$

2 基于瞬时无功理论的补偿导纳检测

基于瞬时无功功率理论的检测法是电网畸变电流检测的有效方法^[13], 根据三相瞬时无功功率理论建立的谐波检测方法有: p-q法和 $i_p - i_q$ 法。其中基于 $i_p - i_q$ 运算方式的无功电流检测法在三相三线制电路中得到了成功应用。由式(9)可知, 要求 SVC补偿导纳, 只需知道 I_{aq}, I_{bq}, I_{cq} 。下面应用瞬

时无功功率的 $i_p - i_q$ 运算方式推导出所需补偿导纳。

根据对称分量法, 可将三相三线电力负荷的电流分量 i_a 、 i_b 、 i_c 分解为正序分量组、负序分量组和零序分量。因为三相三线制电路中不含基波零序电流分量和各次谐波零序电流分量, 考虑三相电流中含有基波和各次谐波正序和负序电流分量的一般情况, 故系统电流可分解为正序分量组和负序分量组。则 i_a 、 i_b 、 i_c 表示为:

$$i_a = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \phi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \phi_{2n})] \quad (10)$$

$$i_b = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \phi_{1n} - 2/3\pi) + I_{2n} \sin(n\omega t + \phi_{2n} + 2/3\pi)] \quad (11)$$

$$i_c = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \phi_{1n} + 2/3\pi) + I_{2n} \sin(n\omega t + \phi_{2n} - 2/3\pi)] \quad (12)$$

式中: 下标中的1表示正序, 2表示负序, n 表示谐波次数(当 $n=1$ 时表示基波); I 表示电流有效值; φ 表示初相角。将它们变换至 α - β 两相:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [I_{1n} \sin(n\omega t + \phi_{1n}) + I_{2n} \sin(n\omega t + \phi_{2n})] \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} [-I_{1n} \cos(n\omega t + \phi_{1n}) + I_{2n} \cos(n\omega t + \phi_{2n})] \end{bmatrix} \quad (13)$$

据此可求出 i_p 、 i_q 为:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_{1n} \cos[(n-1)\omega t + \phi_{1n}] - \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n} \cos[(n+1)\omega t + \phi_{2n}] \\ -\sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_{1n} \sin[(n-1)\omega t + \phi_{1n}] - \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n} \sin[(n+1)\omega t + \phi_{2n}] \end{bmatrix} \quad (14)$$

它们的直流分量

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_{11} \cos \phi_{11} \\ -\sqrt{3} I_{11} \sin \phi_{11} \end{bmatrix} \quad (15)$$

可见, \bar{i}_p 、 \bar{i}_q 是由基波正序电流分量产生的。将它们反变换即可得出:

$$\begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = C_{23} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = C_{23} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{i}_p \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

则:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{32} C_{pq} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{式中: } C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

结合上述理论, 为得到式 (9) 补偿导纳所需无功电流, 根据图4所示的 $i_p - i_q$ 法无功电流检测原理, 图4中PLL为锁相环电路 (Phase Lock Loop)。该方法中, 需要用到与a相电网电压 e_a 的基波正序分量同相位的正弦信号 $\sin(\omega t)$ 和对应的余弦信号 $\cos(\omega t)$ 。三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 通过Clark变换 C_{32} 和 Park变换C可得 i_q , i_q 经Park反变换C和Clark反变换 C_{23} 即可得出三相基波无功电流 i_{aq} 、 i_{bq} 、 i_{cq} 。

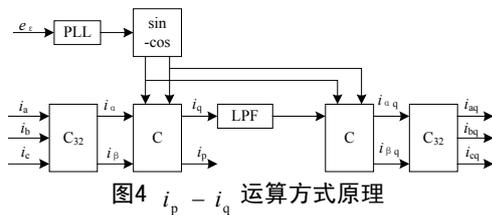


图4 $i_p - i_q$ 运算方式原理
Fig.4 The principle of $i_p - i_q$ detection

将三相电路的各相电流的瞬时值 i_a 、 i_b 、 i_c , 变换到 α 、 β 两相正交的坐标系上研究, 即:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{32} C_{Tq} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\alpha & -\cos\alpha \\ -\cos\alpha & -\sin\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (20)$$

i_p 、 i_q 是由基波正序电流分量产生的。将它们反变换即可得出式 (16)、(17)。

由于检测出来的无功电流 i_q 经过了低通滤波器滤波, 因此输出的电流为直流 i_q , 这就消除了电流中谐波电流对无功电流检测的影响, 保证了检测的精度。最终通过以上方式所检测得到无功电流, 根据式 (9) 求得SVC的补偿导纳并以此来控制晶闸管的触发角。

3 SVC装置仿真

采用 TCR+FC 型的 SVC, 在 Matlab 中建立 Simulink 模型, 其原理图如图 5 所示。一组 Δ 形接线的三相不对称负荷。各相的阻抗为 $Z_{ab} = j5$ 、 $Z_{bc} = 5 + j5$ 和 $Z_{ca} = 5\sqrt{3} + j5$ 接于 $\dot{U}_a = 220 \angle 0^\circ$ 、 $\dot{U}_b = 220 \angle -120^\circ$ 和 $\dot{U}_c = 220 \angle 120^\circ$ 的电源中。控制器中采用本文所述算法。在 0.06 s 时刻投入 SVC, 观察线电流波形, 并通过负序分离模块观测负序电流的变化情况。

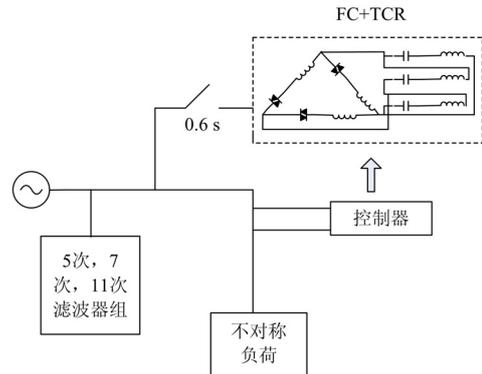


图 5 仿真模型结构图
Fig.5 Simulation model

(1) SVC 未投入时

由于三相负荷不对称性, 系统的三相电流也出现了不平衡, A、B、C 三相电流仿真图如图 6 所示。

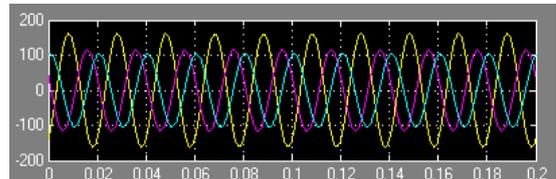
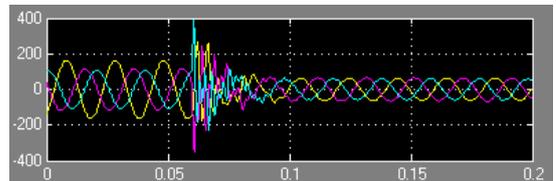


图 6 SVC 未投入时三相电流

Fig.6 The three-phase current of the system after SVC is switched in

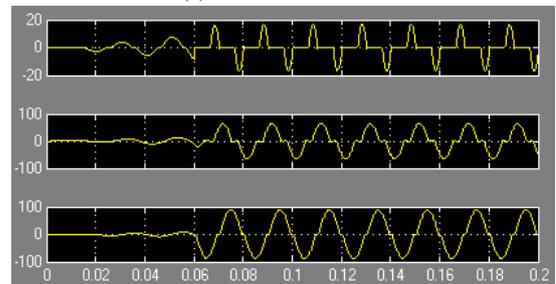
(2) 0.06 s 投入 SVC 后。



(a) SVC 投入时电源侧三相电流



(b) 电源侧的负序电流变化



(c) TCR 三相电流

图 7 SVC 运行效果

Fig.7 The system response after SVC is switched in

由图 7 (a), 可以看出在 SVC 投入之前, 线电流三相严重不平衡。当在 0.6 s 投入 SVC 之后, 经过一小段时间, 线电流三相对称且无畸变。

由图 7 (b), 负序电流在 SVC 投入之前幅值很大(开始一段的 0 是由测量延迟造成的), 当投入 SVC 后, 负序电流的幅值迅速减小到近似为零。

由图 7 (c) 可看出, 在 0.6 s 投入 SVC 后, TCR 三相相电流导通情况, 因为不对称负荷造成各相补偿导纳不同, 所得触发角也同, 最终得出图 7 (c) TCR 各相电流不同。由此可以看出, 本文所述算法是正确的。

图 8 为电源侧有功功率、无功功率, 从图中可以看出在 0.06 s 经过 SVC 的无功功率补偿, 经过大约一个周期的时间感性无功功率被迅速补偿为零, 表明了该 SVC 模型具有很快的动态响应能力。

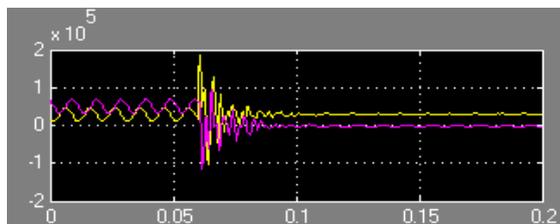


图 8 电源侧有功功率与无功功率

Fig.8 The reactive power and active power

表 1 补偿前后效果对比

Tab.1 The effect after and before compensation

补偿前情况		补偿后情况	
三相电流 / A	$\cos\varphi$	三相电流 / A	$\cos\varphi$
114.34 $\angle-60^\circ$	0.47	41.158 $\angle 0^\circ$	1
81.15 $\angle 160^\circ$		41.044 $\angle -120^\circ$	
73.62 $\angle 75^\circ$		41.008 $\angle 120^\circ$	

4 结论

本文在三相负荷平衡化原理和瞬时无功功率理论的基础上, 首次提出补偿导纳的新算法, 该算法具有响应速度快、对采样时刻没有要求等优点, 克服了目前一些导纳算法的不足。

(1) 该补偿方法以 T.J.E 米勒平衡补偿理论为依据, 通过补偿负荷的基波无功电流和基波负序电流实现平衡化补偿。

(2) 这种方法计算补偿导纳简单, 有效, 在检测的电气量——无功电流时, 可以做到没有任何的延时, 保证了实时性。

(3) 利用这种检测技术, 能够避免线路中各种谐波电流造成的影响, 保证了所计算的补偿导纳的准确性。

(4) 通过该控制策略所得仿真结果理想, 在 SVC 装置投入后经过一个多周期不对称的三相电流基本平衡, 并且功率因数显著提高。

基于以上结论, 本文通过检测瞬时无功电流并对其进行量化, 从而得到了 SVC 补偿导纳的表达形式。最后, 本文还完成了 Matlab/Simulink 仿真模型。

参考文献

- [1] 杜继伟, 王胜刚. 静止无功补偿器对电力系统性能改善的综述[J]. 继电器, 2007, 35 (22): 82-85.
DU Ji-wei, WANG Sheng-gang. The overview of static var compensators on power system performance improvement[J]. Relay, 2007, 35 (22): 82-85.
- [2] Miller T J E. 电力系统无功功率控制[M]. 胡目根, 译. 北京: 水利电力出版社, 1990.
Miller T J E. Power system reactive power control[M]. HU Mu-gen, trans. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990.
- [3] 谢连富, 单铁铭. 不平衡电流无功补偿方法的研究[J]. 继电器, 2006, 34 (9): 76-79.
XIE Lian-fu, SHAN Tie-ming. Research on unbalanced reactive current compensation method[J]. Relay, 2006, 34 (9): 76-79.
- [4] 韦钢, 卢波. 平衡不对称负荷及功率因数补偿装置的研究[J]. 中国电力, 1997, 30 (9): 33-36.
WEN Gang, LU Bo. The study of device on compensation for unbalanced load and power factor[J]. Electric Power, 1997, 30 (9): 33-36.
- [5] 刘俊丰, 同向前, 陈贵亮. 不对称负荷动态无功补偿方法的研究[J]. 电力电容器, 2005 (1): 14-17.
LIU Jun-feng, TONG Xiang-qian, CHEN Gui-liang. Asymmetric load dynamic reactive power compensation method[J]. Power Capacitor, 2005 (1): 14-17.
- [6] 李鑫, 曾光, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 无功电流检测方法[J]. 电力电子技术, 2006, 40 (5): 121-123.
LI Xin, ZENG Guang, et al. SVC reactive current detection method based on instantaneous reactive theory[J]. Power Electronics, 2006, 40 (5): 121-123.
- [7] 成立, 范木宏, 王振宇, 等. 基于瞬时无功功率的改进型谐波电流检测[J]. 高电压技术, 2007, 33 (4): 46-49.
CHENG Li, FAN Mu-hong, WANG Zhen-yu, et al. Improved harmonic current detection based on Instantaneous reactive power[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (4): 46-49.
- [8] 叶德云, 罗欢, 刘开培. 基于 Fryze 功率定义的三相系统广义无功实时检测方法[J]. 电气应用, 2005, 24 (10): 142-147.
YE De-yun, LUO Huan, LIU Kai-pei. Reactive real-time detection method based on Fryze of three-phase power systems[J]. Electrical Applications, 2005, 24 (10): 142-147.

(下转第 130 页 continued on page 130)

- probabilistic loading-dependent model of cascading failures and possible implication for blackouts[C].// Proceeding of the 36th Hawaii International Conference on System Science. 2002.
- [9] Ian Dobson, Benjamin A Carreras, David E Newman. A branching process approximation to cascading load-dependent system failure[C]. //Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences. 2004.
- [10] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for dynamicals in electrical power system blackouts[C]. //Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Science. 2001.
- [11] 梅生伟, 翁晓峰, 薛安成, 等. 基于最优潮流的停电模型及自组织临界性分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (13): 1-5, 32.
MEI Sheng-wei, WENG Xiao-feng, XUE An-cheng, et al. Blackout model based on OPF and its self-organized criticality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (13): 1-5, 32.
- [12] Daniel S Kirschen, Dilan Jayaweera, Djusko P Nedic. A probabilistic indicator of system stress[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3).
- [13] 易俊, 周孝信. 考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14): 5-9.
YI Jun, ZHOU Xiao-xin. Cascading failure model of power grids considering frequency response characteristic and hidden failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (14): 5-9.
- [14] 张硕, 顾雪平. 电力系统大停电事故仿真的故障序列选择[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 16-20.
ZHANG shuo, GU Xue-ping. Determination of the fault series in cascading fault simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 16-20.
- [15] 燕萍. 计及频率变化的电力系统仿真潮流程序[J]. 华东电力, 1994, (7): 13-16.
- [16] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [17] ZHANG Jian-feng, Fernando L Alvarado. A heuristic model of cascadeing line trips[C]. //8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University. Ames(Iowa): 2004.
- [18] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 96 (6): 2047-2054.

收稿日期: 2009-12-23; 修回日期: 2010-03-29

作者简介:

顾雪平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防护和系统恢复、智能技术在电力系统中的应用;

张硕(1984-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与设计、电力系统安全防护和系统恢复; E-mail: fight618@163.com

梁海平(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全防护和系统恢复。

(上接第 114 页 continued from page 114)

- [9] 殷波, 陈允平, 邓恒, 等. α - β 坐标系下瞬时无功功率理论与传统功率理论的统一数学描述及物理意义[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (5): 42-45.
YIN Bo, CHEN Yun-ping, DENG Heng, et al. The mathematical description and physical meaning of Instantaneous reactive power theory and conventional power theory under α - β coordinates[J]. Electrotechnical Journal, 2003, 18 (5): 42-45.
- [10] 杨君, 王兆安, 邱关源. 不对称三相电路谐波及基波负序电流实时检测方法研究[J]. 西安交通大学学报, 1996, 30 (3): 94-100.
YANG Jun, WANG Zhao-an, QIU Guan-yuan. Asymmetric three-phase circuit harmonic and fundamental negative sequence current detection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30 (3): 94-100.
- [11] 刘兆燊, 李建林, 韩珏, 等. 瞬时无功及谐波电流的闭环检测电路[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (1): 45-47.
LIU Zhao-shen, LI Jian-lin, HAN Jue, et al. Closed-loop detecting circuit for instantaneous reactive and harmonic current[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2005, 17 (1): 45-47.
- [12] Akagi H. Trends in active power line conditioners[J]. IEEE on Trans on Power Electron, 1994, 9(3): 263-268.
- [13] 王兆安, 杨君. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

收稿日期: 2009-12-19; 修回日期: 2010-06-08

作者简介:

蔡阳(1984-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力系统谐波及补偿技术, 电力系统控制; E-mail: caiyang84@126.com

韦钢(1958-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统谐波及补偿技术、电力系统运行分析、电力系统规划等。E-mail: wg5815@sohu.com