基于瞬时无功理论的 SVC 抑制次同步振荡的附加控制设计

顾 威[1]，李兴源[2]，陈建国[1]，穆子龙[2]

(1.贵州电力试验研究院，贵州 贵阳 550002；2.四川大学电气信息学院，四川 成都 610065)

摘要：HVDC 解决了长距离输电中电压降低、线损加大、无功补偿等问题，却又给系统带来了次同步振荡的危险。SVC 在补偿 HVDC 无功功率需求的同时也可以通过增加附加控制来抑制可能产生的次同步振荡。为了使 SVC 的补偿精确，SVC 附加控制的输入信号取易于获得的电压电流信号且有明显的抑制效果，将采用基于瞬时无功理论的方法来设计 SVC 的控制，消除不对称分量和其他频率下谐波分量的影响，使得控制效果更精准。以向上直流降功率 25%单极孤岛运行方式为例，验证了基于瞬时无功理论设计的 SVC 控制对次同步振荡抑制的有效性。

关键词：瞬时无功理论；静止无功补偿器；次同步振荡；高压直流输电

Additional control design of SVC for mitigating subsynchronous oscillation based on instantaneous reactive power theory

GU Wei[1], LI Xingyuan[2], CHEN Jianguo[1], MU Zilong[2]

(1. Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002, China; 2. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: High voltage direct current (HVDC) solves the problems of voltage reducetion, line loss imcrement and reactive power compensation in long-distance transmission, but it may cause subsynchronous oscillation. Static var compensators (SVC) can compensate reactive power to HVDC and mitigate subsynchronous oscillation with additional control. In order to gain accurate control and easily get signal of voltage and current for additional control, instantaneous reactive power theory should be used to eliminate the influence of harmonic component or asymmetric component. Xiangshang HVDC 75% DC power operation model is applied to verify available mitigation of SVC to subsynchronous oscillation.

Key words: instantaneous reactive power theory; static var compensators (SVC); subsynchronous oscillation; high voltage direct current (HVDC)

中图分类号： TM714.3 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)05-0107-05

0 引言

我国幅员辽阔，能源的分布和负荷的发展却极不平衡，如水利资源集中在西南部地区，煤炭资源集中在华北及西北地区，而负荷中心都在东部地区，长距离输电势必是不可避免的。但是长距离输电却带来了各种问题，使得高压直流输电(HVDC)成为解决西电东送战略的最好方式。

HVDC 传输功率大、控制速度快、调节灵活，随着直流输电技术的不断发展，高压直流输电的优势也越发明显，大有取代远距离交流输电的趋势。另一方面，由于 HVDC 的快速控制，就会存在着和汽轮发电机组轴系机械系统发生次同步扭振相互(SSO)作用的可能性。国内外都已有例子[1-2]证实高压直流输电可能在某些情况下引起发电机组的次同步振荡。

静止无功补偿器(SVC)近年来得到了广泛应用，其有投资小、可靠性高、补偿迅速及调压效果好等显著优点。将 SVC 安装在有 HVDC 的系统中，不仅可以很好地补偿 HVDC 运行时所需的无功功率，还可以通过增加附加控制来抑制发电机组的次同步振荡。传统的 SVC 控制使用的是母线电压有效值和电流有效值来计算调节所需补偿的导纳值，从而计算触发角，以得到所需的无功支持；加入附加

基金项目：南方电网公司项目(K-GZ2012-115)

控制时，附加控制的输入信号往往是发电机组频率或转速偏差，由附加控制和基本控制一起计算出补偿导纳值[3]。传统的控制方式没有考虑系统电压和电流的畸变，当系统出现不对称故障时，系统中存在大量的不对称分量，且在次同步振荡情况下还会有次同步分量存在，这样都会降低控制的精确度，并且发电机的频率及转速偏差量在实际工程中都是较难测得的信号量，信号的传输还会带来延迟，都会使得次同步振荡的抑制达不到较好的效果。

三相电路瞬时无功理论最早于 1983 年由赤木泰文提出，以瞬时实功率和瞬时虚功率的定义为基础[4-5]。利用三相电路瞬时无功理论来改进 SVC 的基本控制和附加控制，使得其无功补偿不受系统中的不对称分量以及次同步分量的影响，SVC 能够真正实现电力系统的瞬时控制；附加控制也可以直接采用发电机端的电压电流量，通过瞬时无功理论进行三相分解，精确得到所需抑制的次同步分量，计算出补偿的导纳值。

1 次同步振荡的机理

在有 HVDC 的系统中存在着发电机组轴系发生次同步扭振相互作用的可能性。次同步振荡的机理是在 1977 年 Square Butte 直流工程调试中被认识的[6]，HVDC 换流器的控制与其邻近的汽轮发电机组的轴系扭振相互作用机理可用图 1 所示的过程来解释。

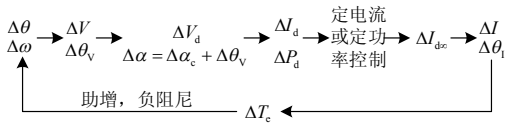


图 1 直流输电引起的扭振示意图

Fig. 1 Schematic diagram of torsional oscillation caused by HVDC

当与整流站紧密耦合的发电机组轴系上受到微小的电磁转矩扰动，将会导致某一扭振模态的转速和转角的摄动，即图中的 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\theta$，继而引起机端电压幅值和相位的摄动，即图中的 ΔV 和 $\Delta\theta_{\mathrm{V}}$，从而导致换流母线电压幅值与相位的摄动。其中，$\Delta\theta_{\mathrm{V}}$ 会使整流站的实际触发角和预期的触发角间有同样大小的偏差 $\Delta\alpha$，造成了直流电压的摄动 ΔV_{d}；机端电压幅值的摄动 ΔV 也会引起直流电压的摄动。对应于直流电压的摄动，直流电流也会产生一个电流摄动 ΔI_{d}，并产生直流功率摄动 ΔP_{d}。直流电压和电流偏离了平衡状态，直流的定电流或定功率控制为防止这种偏差，会加快校正和调整速度，但这最终不可能完全消除 ΔI_{d} 或 ΔP_{d}，从而引起了发电机电磁转矩的摄动 ΔT_{e}，最终又反馈作用于机组轴系。如果发电机转速变化与由此引起的电磁转矩变化之间的相位滞后(包括闭环控制系统的附加相位滞后)超过 90°，阻尼转矩为负，形成了一种正反馈性质的扭振相互作用，则这个电磁转矩变化 ΔT_{e} 将会助增初始扰动，即出现电气负阻尼。一旦该负阻尼强于相应频率下轴系呈现的机械阻尼，发电机组轴系就会出现 HVDC 控制系统引起的轴系扭振失稳[7-9]。

2 瞬时无功功率理论的简述和算法原理

瞬时无功理论的核心是采用 Clarke 变换将三相电路传统的 A、B、C 相变换到两相正交的 α、β 坐标系下[10-13]。

设三相电路的瞬时电压和瞬时电流分别为 u_{a}、u_{b}、u_{c} 和 i_{a}、i_{b}、i_{c}，考虑到 SVC 一般是通过变压器接入系统的，而零序分量不能通过三角形接法的变压器低压侧，只需考虑瞬时电压电流中的正序、负序分量。将三相坐标系下的瞬时电压电流变换到正交的 α、β 直角坐标系下，有

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{23} \begin{bmatrix} u_{\mathrm{a}} \\ u_{\mathrm{b}} \\ u_{\mathrm{c}} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{23} \begin{bmatrix} i_{\mathrm{a}} \\ i_{\mathrm{b}} \\ i_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{C}_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

按照功率的定义，瞬时有功、无功功率为

$$p + \mathrm{j}q = u \cdot i^{*} = \left(u_\alpha + \mathrm{j}u_\beta\right)\left(i_\alpha - \mathrm{j}i_\beta\right) \tag{3}$$

当瞬时电压电流中含有不平衡分量或谐波分量时，经变换后的瞬时值可以表示为

$$u = u_\alpha + \mathrm{j}u_\beta = \sqrt{2}\sum u_{\mathrm{k}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_{\mathrm{k}}^{+}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{k}}t} + \sqrt{2}\sum u_{\mathrm{k}}^{-}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi_{\mathrm{k}}^{-}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_{\mathrm{k}}t} \tag{4}$$

$$i = i_\alpha + \mathrm{j}i_\beta = \sqrt{2}\sum i_{\mathrm{k}}^{+}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Phi_{\mathrm{k}}^{+}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{k}}t} + \sqrt{2}\sum i_{\mathrm{k}}^{-}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Phi_{\mathrm{k}}^{-}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_{\mathrm{k}}t} \tag{5}$$

式中：u_{k}^{+} 和 i_{k}^{+} 为频率 ω_{k} 下的电压和电流的正序分量有效值；φ_{k}^{+} 和 Φ_{k}^{+} 为频率 ω_{k} 下的电压和电流的正序分量相位角；u_{k}^{-} 和 i_{k}^{-} 为频率 ω_{k} 下的电压和电流的负序分量有效值；φ_{k}^{-} 和 Φ_{k}^{-} 为频率 ω_{k} 下的电压和电流的负序分量相位角。

瞬时无功理论的坐标变换使得谐波分量的正

序、负序运动变得更加直观。当系统中的电压电流出现了频率为 ω_k 的谐波以及不平衡分量时，经过 α、β 坐标变换，各次谐波的正序分量和负序分量以不同的角速度和旋转方向运动，同一个频率下的电压和电流分量是相对静止的。因此，将 u 和 i 乘以 $e^{j\omega_k t}$ 或 $e^{-j\omega_k t}$，就可以使频率为 ω_k 的谐波的正序或负序分量在 α、β 坐标上的投影为直流量，而其他旋转矢量的投影仍然是周期量。当需要得到频率 ω_k 下的正序量时，有

$$\begin{aligned}\left(u_\alpha + ju_\beta\right)e^{-j\omega_k t} = &\left(u_\alpha \cos\omega t + u_\beta \sin\omega t\right) + \\ &j\left(u_\beta \cos\omega t - u_\alpha \sin\omega t\right)\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\left(i_\alpha + ji_\beta\right)e^{-j\omega_k t} = &\left(i_\alpha \cos\omega t + i_\beta \sin\omega t\right) + \\ &j\left(i_\beta \cos\omega t - i_\alpha \sin\omega t\right)\end{aligned} \tag{7}$$

改为矩阵形式，则为

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \cos\omega_k & \sin\omega_k \\ -\sin\omega_k & \cos\omega_k \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：u_p、u_q 为含有电压直流量的有功量和无功量；i_p、i_q 为含有电流直流量的有功量和无功量。

将 u_p、u_q 和 i_p、i_q 通过低通滤波器后就可以得到相应直流量的幅值和相位，即频率 ω_k 下的分量：

$$\overline{u}_p + j\overline{u}_q = \sqrt{2}u_k^+ e^{j\varphi_k^+} \tag{10}$$

$$\overline{i}_p + j\overline{i}_q = \sqrt{2}i_k^+ e^{j\varphi_k^+} \tag{11}$$

再将得到的直流分量作一个逆变换，就可以得到不含谐波分量和不对称分量的三相值。逆变换如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{ak} \\ u_{bk} \\ u_{ck} \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{23}^{-1}\boldsymbol{C}^{-1}\begin{bmatrix} \overline{u}_p \\ \overline{u}_q \end{bmatrix},\quad \begin{bmatrix} i_{ak} \\ i_{bk} \\ i_{ck} \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{23}^{-1}\boldsymbol{C}^{-1}\begin{bmatrix} \overline{i}_p \\ \overline{i}_q \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，u_{ak}、u_{bk}、u_{ck} 和 i_{ak}、i_{bk}、i_{ck} 分别为频率 ω_k 下的 A、B、C 三相瞬时值。

取不同的 ω_k 就可以得到不同频率下的分量，实现对正序量和谐波量的精确检测。

3　基于瞬时无功理论的 SVC 控制系统设计

当 HVDC 系统发生了不对称故障并引起了次同步振荡时，精确的无功补偿是很重要的，不仅能稳定电压，使系统快速恢复到平稳状态，还能通过附加控制产生次同步频率下的电流量，以抵消系统中出现的次同步电流，消除电压摄动，减小发电机转速偏差和电磁转矩变化之间的相位滞后，增加电气阻尼，抑制次同步振荡。

根据瞬时无功功率的理论，可以将 SVC 的控制分为 A、B、C 三相，每一相分别触发。以 A 相为例，SVC 的基本控制如图 2 所示。

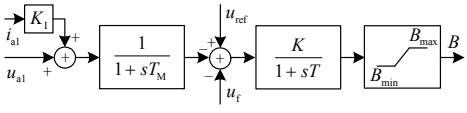


图 2　SVC 的基本控制

Fig. 2 Basic control of SVC

将经过瞬时功率变换和滤波并逆变换之后的 A 相基频电压电流 u_{a1}、i_{a1} 经过一个一阶环节后与附加控制得到的电压 u_f 和参考电压 u_{ref} 相加，之后再经过一个一阶环节，并对结果进行限幅，得到最终的导纳值，从而用该导纳值计算出触发角，以改变 SVC 的输出。

附加控制的输入信号应取较容易测量获得的量，基于电气量测量的次同步振荡可以测量三相瞬时电流和三相瞬时电压[3]，因而取发电机机端电压电流量最为合适。将电压电流量经瞬时无功理论变换，取出次同步频率下的分量，经过低通滤波器后再进行逆变换，得到次同步频率下的电压电流分量 u_{ak} 和 i_{ak}，将其作为附加控制的输入信号。以 A 相为例的 SVC 附加控制如图 3 所示。

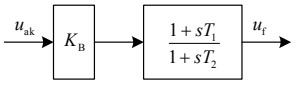


图 3　SVC 的附加控制

Fig. 3 Additional control of SVC

4　基于向上直流的仿真分析

向上直流起于四川复龙换流站，止于上海奉贤换流站，周围有 1 200 MW的福溪电厂、600 MW 的珙县电厂和1 200 MW的泸州电厂这三个火电厂。考虑最严重的孤岛运行方式下，向上直流降功率至25%单极运行情况。向上直流孤岛运行方式的拓扑图如图 4 所示。

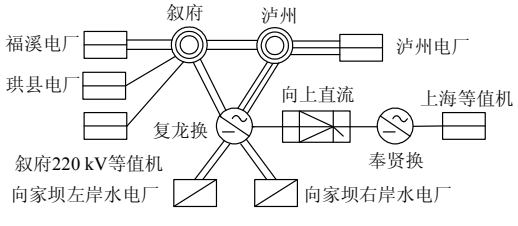
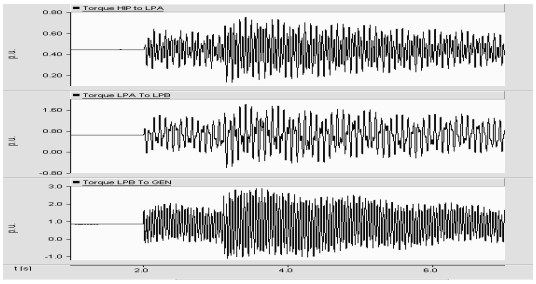


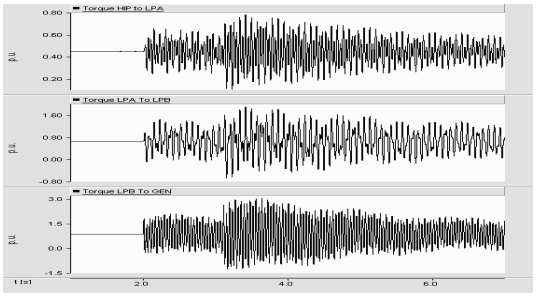
图 4　向上直流孤岛运行方式

Fig. 4 Island operation of Xiangshang

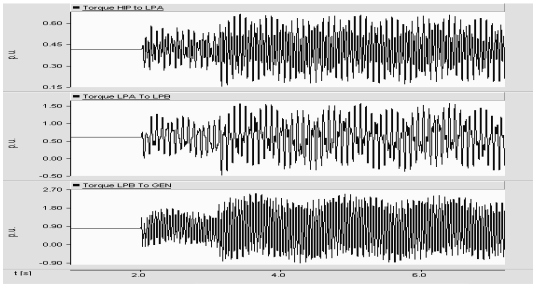
为激发出系统的次同步振荡，在叙府和复龙换两条线路中的一条上设置单相永久短路故障，故障从 2 s 开始，2.1 s 线路两端单相断路器跳开切除故障，3.1 s 两端断路器重合闸不成功，于 3.2 s 两端的三相断路器动作，切除该回线路。仿真时间设置为 7 s，当不加入 SVC 的情况下，按照以上的故障设置，各发电厂机组轴系扭振如图 5 所示。



(a) 福溪电厂



(b) 珙县电厂



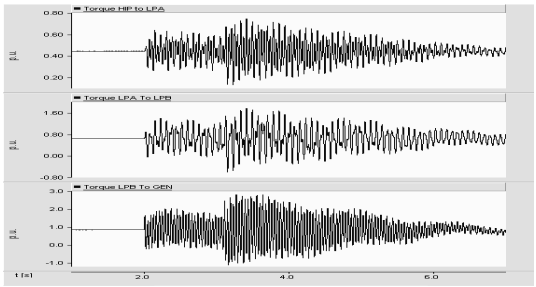
(c) 泸州电厂

图 5 机组轴系扭矩

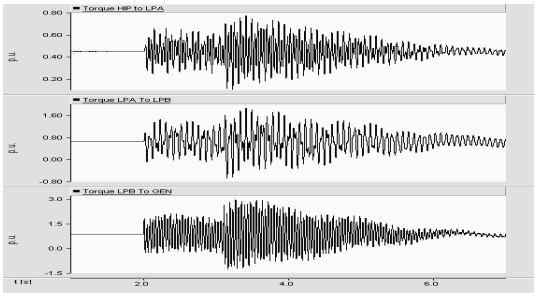
Fig. 5 Torque of generators

从图 5 中可以看出，故障激发了各个机组的轴系扭振，虽然转矩的扭振是衰减的，不过衰减缓慢，尤其是泸州电厂，情况较为严重，极易造成机组轴系的疲劳累积，导致大轴损毁。为了对扭振进行抑制，考虑加入采用了瞬时无功理论控制的 SVC。此 SVC 既要对 HVDC 进行一定的无功补偿，又要能最大限度地对各个电厂的轴系扭振进行抑制，因而考虑将 SVC 安装在叙府结点处。

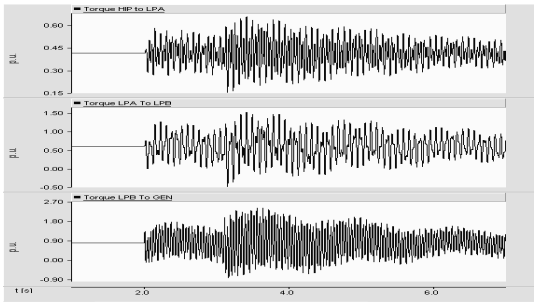
投入 SVC 的仿真采用和图 5 一样的故障设置，SVC 在 3.3 s 投入。在加入了 SVC 后的机组轴系扭振如图 6 所示。



(a) 福溪电厂



(b) 珙县电厂



(c) 泸州电厂

图 6 机组轴系扭矩

Fig. 6 Torque of generators

从图 6 中可以看出，加入了 SVC 后，各个机组的轴系扭振均有所减小，由于 SVC 的附加控制信号取的是叙府附近电厂的，且泸州电厂距离较远，因而对泸州电厂的抑制效果稍差，但是比起没有抑制的情况，转矩扭振还是有了大幅下降；而直接连接在叙府结点上的福溪电厂和珙县电厂扭振得到了较大抑制。

5 结论

HVDC 调节速度快，控制灵活，且高压直流输电很适合于长距离输电。但是正是因为 HVDC 控制的快速性，很有可能会引起次同步振荡现象，导致发电机轴系的损毁。而 SVC 可以用在 HVDC 系统中，为直流系统补偿无功功率，且增加附加控制后

还可以对次同步振荡起到一定的抑制作用。但是传统的 SVC 控制信号容易受到系统中的谐波电压电流的影响，且作为附加控制输入量的发电机频率或转速偏差量存在不宜测量和传输延迟的缺点，采用瞬时无功功率理论，通过坐标变换来实现输入信号的准确性，且附加控制亦能选取发电机出口处的电压电流量，信号选取方便。在向上直流降功率 25%的单机孤岛运行方式下进行验证，结果证明了基于瞬时无功理论的 SVC 附加控制能较好地抑制系统轴系的扭转振荡。

参考文献

[1] STAMKOLAI N, PIWKO R J. Subsynchronous torsional interactions with static VAR compensators concepts and practical implications[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1990, 5(4): 1324-1332.

[2] LL M C, HODGES D K. Experience with 500 kV subsynchronous resonance and resulting turbine generator shaft damage at Mohave generating station[M]. New York: IEEE Press, 1976: 22-29.

[3] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[4] 殷波, 陈允平, 邓恒, 等. 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, 58.
YIN Bo, CHEN Yunping, DENG Heng, et al. Uniform mathematical description of instantaneous reactive power theory and conventional power theory and its physical meaning in coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 42-45, 58.

[5] 蔡阳, 韦钢, 雷振. 新型不对称负荷补偿装置控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 110-114, 130.
CAI Yang, WEI Gang, LEI Zhen. Research on new type of asymmetric load compensator control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 110-114, 130.

[6] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[7] 倪以信, 王艳春, 陈寿孙, 等. 多机系统直流输电引起的次同步振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(2): 64-71.
NI Yixin, WANG Yanchun, CHEN Shousun, et al. A study of HVDC-caused subsynchronous oscillations in multimachine system[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(2): 64-71.

[8] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于 ADPSS 的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 137-142.
CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation on HVDC power transmission system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 137-142.

[9] 李建设, 陈磊, 陈亦平, 等. 基于振荡能量消耗的 HVDC 和 SVC 附加阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 9-15.
LI Jianshe, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Supplementary damping control of HVDC and SVC based on oscillation energy dissipation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 9-15.

[10] 逯帅, 刘秀成, 陈建业, 等. SVC 平衡控制方法及其所需信号的检测[J]. 电工电能新技术, 2002, 21(2): 17-20.
LU Shuai, LIU Xiucheng, CHEN Jianye, et al. A balance control method and signal detection needed for SVC control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2002, 21(2): 17-20.

[11] 范瑞祥, 周腊吾, 肖红霞. 基于瞬时值的 SVC 无功及负序补偿算法[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 247-252.
FAN Ruixiang, ZHOU Lawu, XIAO Hongxia. The reactive power and negative sequence compensation algorithm of SVC based on instantaneous value[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 247-252.

[12] 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.
DING Renjie, LIU Jian, ZHANG Jun, et al. New control method of SVC based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 47-51.

[13] 程远楚, 徐德鸿, 刘燕, 等. 基于瞬时无功理论的 SVC 低通滤波器设计与应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 138-143.
CHENG Yuanchu, XU Dehong, LIU Yan, et al. Design and application of lower-pass filter based on instantaneous reactive theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 138-143.

收稿日期：2014-05-04；　修回日期：2014-07-31

作者简介：

顾　威(1986-)，女，通信作者，硕士研究生，工程师，研究方向为新能源发电及接入问题研究、电力系统稳定与控制；E-mail：xiaozhuzhiyi@163.com

李兴源(1945-)，男，博士，教授，博士生导师，中国电机工程学会理事，IEEE 高级会员，研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源发电及接入问题研究等；

陈建国(1972-)，男，高级工程师，研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑　张爱琴)