PWM 静止无功补偿器提高系统阻尼的研究

王琦[1,2], 李天然[1], 吴启涛[2], 纪延超[2]

(1. 南京师范大学电气与电子工程学院, 江苏 南京 210042;　2. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 长距离大功率输电系统, 在因故障引起的暂态过程中, 功角振荡衰减得很慢, 有时甚至不衰减, 主要原因是系统本身缺乏足够的阻尼。本文从理论上论证了一种基于 PWM 的静止无功补偿器(PSVC)能够提高系统阻尼特性的原理; 并利用等面积法则证明了 PSVC 采用频率作为控制信号时具有最佳的阻尼效果, 给出了 PSVC 的模型; 最后通过仿真计算所得的结果, 验证 PSVC 提高系统阻尼特性的效果。

关键词: 静止无功补偿器;　阻尼特性;　电力系统暂态稳定

中图分类号: TM714.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1003-4897(2003)10-0018-05

1　引言

静止无功补偿器被广泛应用在电力系统中, 它是灵活交流输电系统的一个重要组成部分, 对改善电网电压质量, 提高系统暂态稳定性起着越来越重要的作用。随着电力电子技术的迅速发展, 基于自关断开关器件应用到静止无功补偿器上。1994 年, Hua Jin 等人在前人基础上提出了一种新型的 PWM 静止动态无功补偿器[1], 这就是我们所要研究的新型静止无功补偿器 PSVC。它用自关断开关取代了晶闸管来控制电抗器的等效电抗。本文提出了一种基于新型静止无功补偿器 PSVC 抑制系统低频振荡, 提高系统暂态稳定性的方法。

以往我们都采用电力系统稳定器 PSS, 在电压偏差外再增加一个辅助反馈变量, 这样, 通过对发电机励磁实行控制就可增加系统的阻尼系数。但是本文所研究的低频振荡频率在 1Hz 左右。在大多数情况下, PSS 对于这种低频振荡不具有有效的衰减作用。

通过分析研究表明, 在对静止无功补偿器 PSVC 引入母线电压频率的偏差作为辅助控制信号后, 在新的控制规律作用下, PSVC 还将会对提高系统的阻尼特性作出贡献。

1.1　PSVC 的工作原理分析

PSVC 的结构见图 1(a), 开关 $S_{1,2,3}$周期性地接通和关断电感与三相交流系统, 而辅助开关 $S_{4,5,6}$在 $S_{1,2,3}$关断期间允许电感电流续流, 因此 $S_{1,2,3}$与 $S_{4,5,6}$导通和关断的关系为: $S_{1,2,3} = \overline{S_{4,5,6}}$。

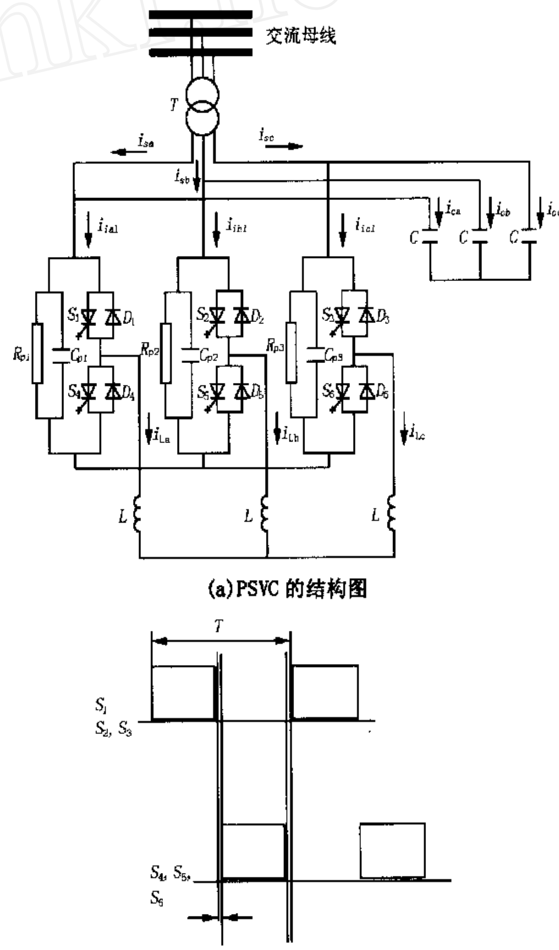
若不考虑谐波, PSVC 的等效电抗为:

$$X_b = X_{bm} / D^2 \tag{1}$$

总体来说, PSVC 与传统无功补偿器(如: TCR)相比, 具有如下优点:

(1) 结构简单。

(2) 控制方案容易实现。它不需与主线路同步, 可在开环条件下运行, 被控电抗器的等效电抗通过



(a) PSVC 的结构图

(b) PSVC 的触发信号图

图 1　PSVC 的原理图

Fig. 1　Principle diagram of PSVC

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

开关的占空比来调节, 并且可在很宽的范围内变化。

(3) 由于补偿器的开关频率高, 所以响应速度快, 并且不会产生低次谐波, 高次谐波可以通过产生超前无功的电容和变压器的漏抗滤除, 不需额外的滤波器。

2　PSVC 提高系统阻尼

典型地, 当发电机组通过远距离输电线与无限大系统连接时, 即使一个小扰动, 都会使得整个原动机发电机组的转子相对于电力系统发生摇摆, 尤其是在重负荷情况下的互联电力系统中。这种电磁振荡的自然振荡频率一般只有几赫兹, 甚至更小, 而且由于衰减率较小, 该振荡可能近似等幅地持续几分钟后消失, 也可能慢慢扩散, 直到系统解列。

由于调速器的反应速度比较慢, 其对系统振荡的影响很小, 另外 PSVC 优于其他无功补偿器的主要优点是, 它能够迅速改变无功输出, 因此机械功率 P_m 的影响可忽略不记, 那么 PSVC 提高系统阻尼的功能也只有靠控制传输功率 P_e 来实现了。

根据等面积准则, 为了实现系统的动态稳定性, 加速面积应该随着转子角的振荡不断减小, 即当 δ 增加 ($\Delta\omega > 0$) 时, 抬升 $P-\delta$ 曲线, 如图 2 (a) 所示, 当 δ 减小 ($\Delta\omega < 0$) 时, 降低功角特性, 如图 2 (b) 所示, z 最终使得振荡系统趋于一稳定值 δ, 而不是以恒定角度振荡。

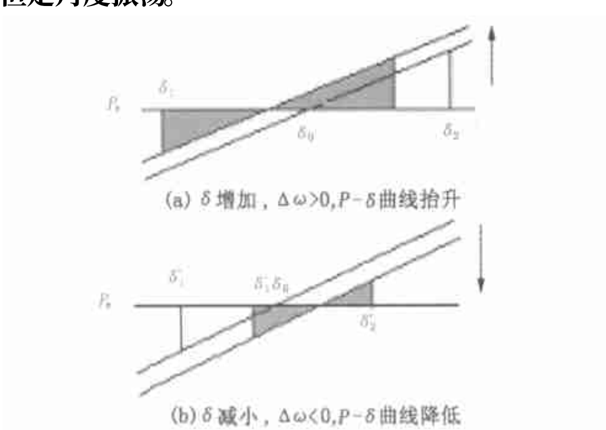


图 2　功率特性的基本控制

Fig. 2　Basic control of the characteristic of power

2.1　PSVC 改变系统功角特性

在图 3 (a) 单机无穷大系统中, 发电机采用经典二阶模型, 即 $E' =$ 常数, PSVC 是一个可连续调节电纳 B_{psvc} 的无功补偿器, 其中 x_1 为线路阻抗与发电机暂态电抗 x'_d 之和。当 PSVC 提供无功给系统时, B_{psvc} 容性, 即 $B_{psvc} > 0$; 当 PSVC 从系统吸收无功时, B_{psvc} 感性, 即 $B_{psvc} < 0$。

用星—三角变换可得等效电路图 3 (b)。此时系统从发电机到无限大系统的转移电抗由未并 PSVC 时 $x_1 + x_2$ 变为 x_{12}, 其值为:

$$x_{12} = x_1 + x_2 + x_3 + x_1 x_2 / x_b \tag{2}$$

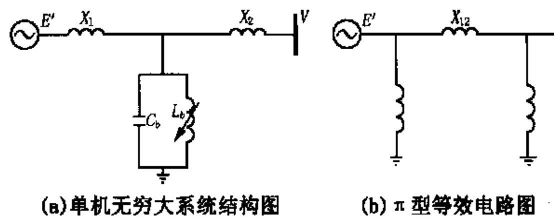


图 3　单机无穷大系统及 π 型等效电路

Fig. 3　Single-unit indefinite system and π type equivalent circuit

则当 PSVC 补偿器工作时, 系统的功角特性为:

$$P_e = \frac{E' U}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_b} \sin\delta \tag{3}$$

其中, PSVC 容性, 即 $B_{psvc} > 0$ 时, 系统的功角特性被 PSVC 抬升, 向系统发送无功, PSVC 感性, 即 $B_{psvc} < 0$ 时, 系统的 $P-\delta$ 曲线被降低, 吸收系统无功。如图 4 所示。

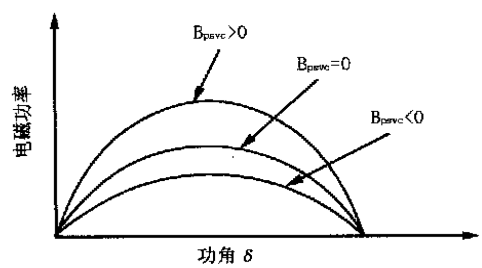


图 4　PSVC 对传输特性的影响

Fig. 4　Influence of the characteristic of transmission with PSVC

显而易见, PSVC 输出 B_{psvc} 可以改变系统的功角特性。

由上节可知, 要想稳定系统, 提高系统动态稳定性, 必需随着系统的要求控制 (抬升或降低) 传输功率特性曲线 $P_e - \delta$。本节又指出, 根据功角特性, 传输功率 P_e 的改变是通过无功补偿器输出的连续变化实现的。当 $B_{psvc} > 0$ 时, 功角特性抬升, 当 $B_{psvc} < 0$ 时, 功角特性降低。归根结底, PSVC 对低频振荡的抑制作用是由 B_{psvc} 所决定的, 那么对于 PSVC 改善系统阻尼的研究可以通过分析系统接入 PSVC 后, PSVC 输出量 B_{psvc} 的动态变化过程来完成。尤其是在高输电量区域互联网系统中, PSVC 抑制系

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

统低频振荡的能力得到大大地提高, 这是因为随着电压等级提高, P_e- δ曲线的变化幅度将增大, 导致PSVC 的补偿效果更加显著。

2.2 $\Delta\omega$辅助控制

PSVC 的输出B_{psvc}决定了 PSVC 改善系统阻尼的作用。这样就引入了一个附加控制量, 根据系统的振荡情况控制B_{psvc}的大小, 一般来说, 可以采用多种不同的附加控制信号, 如有功、无功、电流及频率等。研究和计算表明, 只有采用频率作为其附加控制信号才能产生最佳阻尼效果。

这里, 我们采用$\Delta\omega$作为辅助控制量控制PSVC的输出, 可得:

$$\Delta x_b = K \cdot \Delta\omega \tag{4}$$

K 为控制增益, 一待定常数。

将发电机的经典二阶模型写成小扰动方程的形式:

$$T_J p^2 \Delta\delta + D p \Delta\delta + \omega_0 \Delta P_e = 0 \tag{5}$$

式中D 为系统的自然阻尼功率系数, 一般情况下其值很小, 可忽略不记; p 为 $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$; P_e 是传输功率, 可由功角特性得出。

在功角特性式(3)中, P_e 是容抗x_b 和功角 δ的函数(不考虑调节励磁), 故式(3)可写成:

$$P_e = f(x_b) g(\delta) \tag{6}$$

用小扰动$x_b = x_{b0} + \Delta x_b$ 和 $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ 代入上式, 可得功率P_e 的偏差量为:

$$\Delta P_e = f(x_{b0}) g'(\delta_0) \Delta\delta + g(\delta_0) f'(x_{b0}) \Delta x_b = m\Delta\delta + n\Delta x_b \tag{7}$$

其中:

$$m = f(x_{b0}) g(\delta_0) = \frac{E\dot{U}}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_{b0}} \cos\delta_0$$

$$n = g(\delta_0) f'(x_{b0}) = \frac{E\dot{U} x_1 x_2}{[(x_1 + x_2) x_{B0} + x_1 x_2]^2} \sin\delta_0$$

将式(4)和式(7)同时代入到式(5)中, 可得PSVC 加上辅助控制信号后, 发电机的二阶模型:

$$T_J p^2 \Delta\delta + (D + \omega_0 n K) p \Delta\delta + \omega_0 m \Delta\delta = 0 \tag{8}$$

显然由式(8)可以看出, 阻尼系数增大了。这里有两个原因, 第一个是因为PSVC 投入后具有可变的容抗x_B, 通过它可以改变系统的转移电抗。如果x_B 是不变的, 则式(3)将变成:

$$\Delta P_e = \frac{E\dot{U}\cos\delta_0}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 / x_{B0}} \Delta\delta \tag{9}$$

因这时功率P_e 只是功角 δ的函数, 故将式(9)代入式(5)后阻尼系数就不再会增大; 第二个原因是有$\Delta x_B = K\Delta\omega$的假设。由于 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, 因此这一假设相当于让 PSVC 的容抗$x_B$ 的变化取决于频率的变化Δf。换言之, 用频率的变化量作为PSVC 可控容抗输出的控制信号, 只有这样才能增大阻尼系数, 产生阻尼振荡的效果。

实际应用中, $\Delta\omega$不能用来作 PSVC 的辅助控制信号。因为通常 $\Delta\omega$无法得到, 为了提高系统阻尼, 我们还可以采用其它辅助信号, 如频率偏移, 功率偏移和电流偏移等。

同样, 用等面积法进行分析。在 PSVC 加入了频率辅助控制信号以后, 对传输特性的影响示于图5。

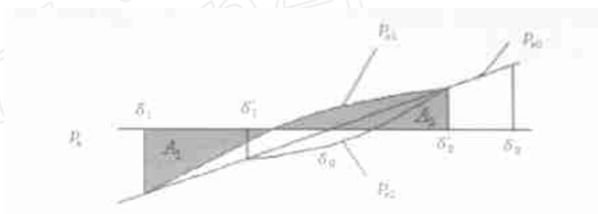


图5 加入附加控制信号后系统的振荡

Fig. 5 Oscillation after joining the signal of control to the system

δ_1 时刻, $\Delta\omega = 0$, 那么 $\Delta P_D = \frac{D}{\omega_0} \cdot \Delta\omega = 0$, 根据式(5), $\Delta x_b = 0$, 又 $\Delta P_e = m\Delta\delta + n\Delta x_b$, $\Delta P_e = 0$, 所以从 P_{e0}上 δ_1 出发, 当发电机转子角 δ增加, $\Delta\omega > 0$时, 同样根据(4)式, 输出正的 Δx_b, 即抬高传输特性, 得传输功率 P_{e1}, 此时 $\Delta P_e + \Delta P_D = m\Delta\delta + n\Delta x_b + \frac{D}{\omega_0}\Delta\omega$, 如果没有辅助控制, 即只有发电机自身的阻尼系数, $\Delta P_e + \Delta P_D = m\Delta\delta + \frac{D}{\omega_0}\Delta\omega$, 很明显, PSVC作用时, 功角特性曲线抬高的幅度要比没 PSVC 作用时大, 这样也就减小了加速度面积, 同时又增大了减速度面积, 功角运动轨迹即为 $\delta_1 > \delta'_2$。对系统增加的阻尼就取决于k 的取值。当加速度面积等于减速度面积时, $\Delta\omega = 0$, 抬升的曲线P_{e1}最终又回到P_{e0}。

δ'_2 时刻, $\Delta\omega = 0$, $\Delta P_D = 0$, $\Delta P_e = 0$, 从P_{e0}上出发, 当 δ减小, $\Delta\omega < 0$时, 输出负的Δx_b, 即降低传输特性, 得传输功率P_{e2}。同理, 有PSVC 时降低的幅度比没有PSVC 时要大, 也就减小了减速度面积, 而增大了加速度面积, 功角轨迹为 $\delta'_2 > \delta'_1$。在加速度面积与减速度面积相等时, $\Delta\omega = 0$, P_{e2}又回到P_{e0}。可见, 通过这种传输特性的动态变化, $\Delta\omega$控制的 PSVC 能够提高系统的暂态稳定性。转子角的运动过程是 $\delta_1 > \delta'_2 >$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

δ_1', 逐渐使振荡系统接近稳态值 δ_0。

这里, 用等面积法同样也证明了 PSVC 通过频率辅助控制, 以调节其输出量 B_{psvc} 从而抬高或降低功角特性 P_e- δ, 最终实现对系统振荡的抑制作用, 使系统快速的趋于稳态值。

3　仿真研究

由式(4)可设计出 PSVC 的信号控制环节, 它的传递函数框图如图 6 所示。这个系统主要由一阶滤波, 超前滞后校正和放大等环节组成, 它可以将频率信号转换成控制电压信号 U_{SCS}。

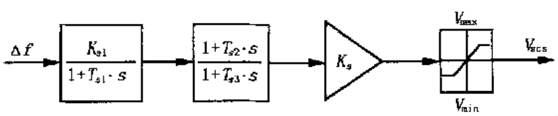


图 6　PSVC 控制信号传递函数框图

Fig. 6　Block diagram of the transfer function for PSVC control signals

其中参数取值为: $K_{s1}=60$, $K_s=1$, $V_{max}=1.2$, $V_{min}=-1.2$, $T_{s2}=0.04$ s, $T_{s3}=0.2$ s

根据以上分析结果, 可知在 PSVC 的闭环纯电压控制下, 引入了一个辅助控制信号 $\Delta\omega$, 经过比例环节, 辅助纯电压控制, 实现对暂态过程的抑制作用。图 7 设计出了 PSVC 模型的传递函数框图。其中, U_t 为测量电压, U_{ref} 为参考电压, U_{SCS} 为控制信号电压, T_f 为滤波器时间常数, K_{SVC} 为 PSVC 控制增益。

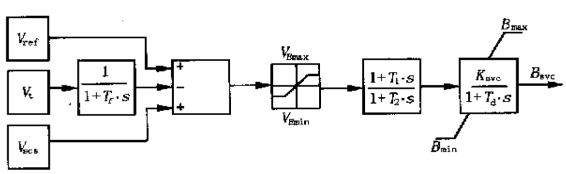


图 7　常规控制系统传递函数框图

Fig. 7　Lock diagram of the transfer function for conventional control system

其中参数取值为: $T_1=0.2$ s, $T_2=0.06$ s, $T_f=0.05$ s, $T_d=0.003$ s, $K_{svc}=20$, $V_{Emax}=1.2$, $V_{Emin}=-1.2$, $B_{max}=1.0$ p.u., $B_{min}=-1.0$ p.u.。

在图 6 和图 7 中, 我们都采用了一个非线性限幅环节。限幅运行时, 系统发电机摇摆曲线会略有变化, 但与不加时相比, 系统发电机间摇摆角明显减小。因此, 对电流或无功进行适当的限幅, 既经济, 又能满足系统稳定性要求。

这章中我们将就单机无穷大系统中接入 PSVC 的情况进行计算机仿真。所用的单机系统接线图如图 3 所示。在暂态稳定性仿真研究中, 假设故障方式为: 0 s 在发电机出口母线上发生三相短路故障, 0.1 s 切除, 0.75 s 重合闸成功。

表 1　仿真所需参数

Tab. 1　Simulation parameters

$S_B=100$ mVA	$V_B=10$ kV	$E'=1.11$ p.u.	$U=1.0$ p.u.
$D=4$	$H=8$ s	$x_d=0.2$ p.u.	$x_1=0.4$ p.u.
$x_2=0.4$ p.u.	$P_0=0.8$ p.u.	$\delta_0=32°$	

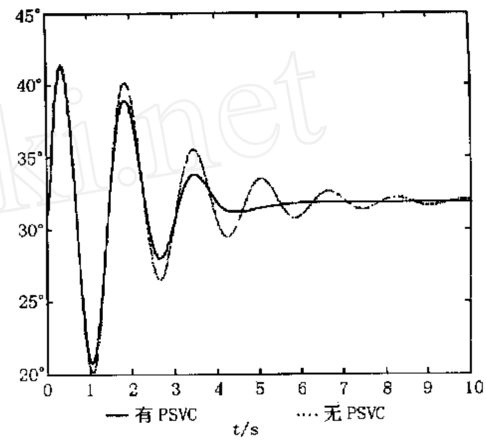


图 8　发动机转子摇摆角 δ 的暂态响应曲线

Fig. 8　The curve of dynamic response of angle δ

如果引入母线电压频率偏差作为辅助控制信号叠加到电压反馈控制回路中, 在新的控制规律下, 静止无功补偿器将提高系统阻尼特性。由仿真验证了发电机转子摆角的迅速衰减。若系统中无 PSVC 静止无功补偿器则存在低频振荡。可见, 此控制方式引入了发电机速度偏差 $\Delta\omega$ 这个辅助控制量, 对 PSVC 的输出 B_{psvc} 实行控制, 由于传输特性(P- δ 曲线)的调节作用, 使得转子摆角得以衰减, 最终趋于稳定。

参考文献:

[1]　Hua Jin, Geza Goos, and Luiz Lopes. An Efficient Switched - Reactor - Based Static Var Compensator. IEEE Trans on Industry Application, 1994, 30(4): 998- 1004.

[2]　Ji Yanchao, Hu Yongxuan, Liu Zhou. A Novel Four - Bridge PWM Static Var Compensator. IEE Proc - Electr. Power Appl, 1997, 144(4): 249- 256.

[3]　L. Angquist, J. Samuelsso. Power Oscillation Damping Using Controller Reactive Power Compensation - A Comparison between Series and Shunt Approaches. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(2): 687-

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

695.

[4] Hammad A E. Analysis of Power Stability Enhancement By Static Var Compensators, IEEE Trans on Power System, 1986, PWRS-1(4): 222-227.

[5] Zhou E Z. Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(2): 655-661.

收稿日期: 2003-05-01

作者简介:

王 琦(1975-), 女, 在职博士研究生, 研究方向电力电子在电力系统中应用;

李天然(1976-), 男, 在职硕士研究生, 研究方向电力市场;

吴启涛(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向电力电子在电力系统中应用;

纪延超(1962-), 男, 博士生导师, 研究方向电力电子在电力系统中应用。

Application of PWM Static Var Compensators in Increasing Power System Damping

WANG Qi[1,2], LI Tian-ran[1], WU Qi-tao[2], JI Yan-chao[2]

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

2. Department of Electrical Engineering, Harin Institure of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In the long distance and large power transmission system, the vibration of power angle hardly decays. The main reason is the shortage of system damping. This paper demonstrates that PWM static var compensator (PSVC) increases the system damping. And by the use of equal area principle, the most optimal damping is tested when PSVC adopts frequency as a control signal. And then the PSVC model is presented. Finally the simulation and calculation results certify the damping characteristics of PSVC.

Key words: static var compensator; damping characteristics; power system transient stability

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net