

SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究

王云洁¹, 胡 骏²

(1.东南大学电气工程学院,江苏南京,210096;2.盐城供电公司,江苏盐城,224005)

摘要:静止无功补偿器(SVC)可以提供电压支持,提高系统电压稳定性,其附加阻尼控制又可以改善系统的阻尼状态,抑制低频振荡,这2种功能之间可能存在一定的相互作用。理论分析了单机无穷大系统中SVC的电压控制与阻尼控制的相互作用,研究表明SVC的阻尼控制与电压控制存在矛盾,增强系统阻尼振荡的能力将会牺牲电压品质。在二区域四机系统中进行仿真,验证了SVC加入附加控制器后有效提高系统阻尼比,但电压稳定性变差,此结果与理论分析相一致。

关键词:SVC;电压稳定性;低频振荡;交互影响

中图分类号:TM761

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)01-0023-03

随着我国西电东送、南北互联和全国联网的战略实施,为提高输电的能力和系统稳定性,我国输电系统引进了静止无功补偿器(SVC),分别装设在广东江门、湖南云田、湖北凤凰山(2套)、河南小刘以及辽宁沙岭的500 kV变电站和鞍山红一变中,这些示范工程投运对电网运行产生明显的效果,对系统的稳定运行产生积极作用^[1]。传统的电力电子控制装置在电力系统中的控制目标通常只有一个,如潮流控制、电压控制或增强系统稳定性等。而在SVC电压环加入附加信号可以同时提供电压支持和阻尼控制,其特点是电压和阻尼控制的双重功能。近几年来,多柔性交流输电系统(FACTS)间的交互影响问题正在研究中。文献[2]指出了PSS与SVC的交互影响并对其进行了多目标协调设计,但是对于单FACTS器件的不同控制目标间的交互影响很少有深入研究;文献[3]分析了静止同步补偿器多目标协调控制。文中从理论上分析了SVC 2种功能间的交互影响,建立了装有SVC的二区域四机系统的模型,通过仿真验证了以上分析研究的有效性。

1 SVC 控制作用

1.1 SVC 的电压控制作用

SVC的电压控制可用1个简化的SVC和电力系统的框图来表示(见图1)。

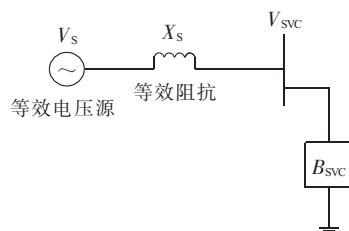


图1 简化电力系统框图

其中系统等效阻抗对应于SVC母线端的短路容量,关系式为:

$$X_s = \frac{V_b^2}{S_C} S_B \text{ (pu)} \quad (1)$$

式中: X_s 为系统等效阻抗; S_C 为SVC母线三相短路容量; V_b 为线电压基准值; S_B 为系统基准容量。如果SVC吸入无功电流 I_{SVC} ,无SVC电压调节时,SVC母线的电压为:

$$V_s = V_{SVC} + I_{SVC} X_s \quad (2)$$

可见SVC电流导致了与系统电压同相位的电压降。SVC母线电压随着SVC感性电流的增加而减小,随着容性电流的增加而增加。式(2)反映了系统特性和系统负荷线的关系,意味着在一个弱的交流系统中(高值)SVC电压控制作用比在一个强的交流系统中(低值)更为有效^[3]。

1.2 SVC 附加阻尼控制抑制低频振荡作用

SVC具有电压控制功能,在纯粹进行电压控制时基本没有提高系统阻尼的作用,应增加附加控制器来实现阻尼控制^[4]。附加阻尼控制器可用相角补偿原理,降低区域间振荡能量从而实现阻尼控制,设计的具体步骤为:(1)对系统进行小干扰分析,分析系统低频振荡特征根,进而分析系统的振荡模式;(2)在相应的振荡频率下,计算滞后角 α ;(3)计算附加控制器的超前滞后角 φ ,确定超前滞后控制参数。

SVC及其附加阻尼控制作用原理^[5]。单机无穷大系统如图2所示,SVC将中点电压调节到 V_m 。假设送端的电压保持恒定,即 $\Delta V_1=0$,则发电机的经典二阶模型为:

$$T_j \Delta \delta \ddot{s} + D \Delta \delta \dot{s} + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial V_m} \Delta V_m = 0 \quad (3)$$

式中: T_j 为发电机惯性时间常数; D 为系统的自然阻尼功率系数; δ 为发电机功角; ω_0 为发电机同步速; P_e 为发

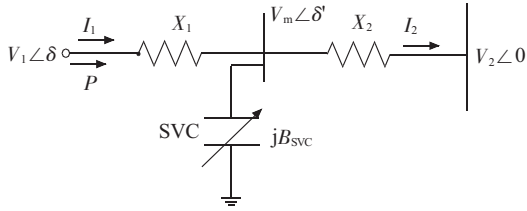


图2 装有 SVC 的单机无穷大系统

电机电磁功率。式(3)描述了系统的小信号动态行为。如果 SVC 严格按照保持中点电压 V_m 恒定的控制方式运行,则 $\Delta V_m=0$,发电机的经典二阶模型为:

$$T_j \Delta \delta s^2 + D \Delta \delta s + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (4)$$

D 一般情况下可以忽略,故式(4)对应特征根方程式的根实部为 0,导致转子角作不衰减振荡。由式(4)可以看出,按恒定电压控制方式运行时不能提供任何系统阻尼^[6]。然而,如果允许对中性点电压进行调制,即可以对系统阻尼做出贡献。若中性点电压 $\Delta V_m = K \frac{d\delta}{dt}$, K 为常数,则:

$$T_j \Delta \delta s^2 + (D + \omega_0 K \frac{\partial P_e}{\partial \delta}) \Delta \delta s + \omega_0 \frac{\partial P_e}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (5)$$

引入附加控制器对电压进行适当调制后, SVC 将系统转化为一个具有正阻尼的系统。从式(5)可以看到,新特征根实部为负,转子角的任何振荡都会随时间而衰减。这种控制特性被称为附加阻尼控制。

2 SVC 电压控制与阻尼作用间的交互影响分析

SVC 附加阻尼控制后能有效抑制低频振荡^[7,8]。图 2 所示的单机无穷大系统中, SVC 的作用相当于在中间母线处并联了一个可变电纳,改变了整条线路的等效阻抗。

未安装 SVC 时,发电机输出的有功功率为:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_1 + X_2} \sin \delta \quad (6)$$

装设 SVC 后,发电机输出有功功率为(利用 Y- Δ 变换):

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_1 + X_2 - B_{SVC} X_1 X_2} \quad (7)$$

调节 SVC 的输出,使 SVC 的并联电纳变化 ΔB_{SVC} , 则有有功功率的增量 ΔP 为:

$$\Delta P = \frac{-X_1 X_2 V_{1,0} V_{2,0} \sin \delta_0}{X_1 + X_2 - B_{SVC,0} X_1 X_2} \Delta B_{SVC} = K_p \Delta B_{SVC} \quad (8)$$

式中: $V_{1,0}, V_{2,0}, B_{SVC,0}$ 分别为 V_1, V_2, B_{SVC} 的初始值。SVC 安装处的母线电压为:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_2 + jX_2 (\dot{I}_1 - jB_{SVC} \dot{V}_m) \quad (9)$$

解得:

$$\dot{V}_m = (V_{2,0} + \frac{X_2}{X_1} \dot{V}_1) / (1 + \frac{X_2}{X_1} - B_{SVC} X_2) \quad (10)$$

调节 SVC 的输出,使之变化 ΔB_{SVC} , 则 SVC 母线电压的增量 ΔV_m 为:

$$\Delta V_m = [X_2 (\dot{V}_2 + \frac{X_2}{X_1} V_{1,0}) / (1 + \frac{X_2}{X_1} - B_{SVC,0} X_2)^2] \Delta B_{SVC} = K_V \Delta B_{SVC} \quad (11)$$

由式(8)可得, SVC 附加控制产生的发电机电磁转矩为:

$$\Delta T_e \approx \Delta P = K_p \Delta B_{SVC} \quad (12)$$

由文献[9]可知, ΔT_e 由 2 个分量组成:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (13)$$

式中: T_s 为系统的同步转矩系数; T_D 为阻尼转矩系数。将其代入式(5)并简要写出其特征根方程:

$$T_j \Delta \delta s^2 + D \Delta \delta s \approx -T_s \Delta \delta - T_D \Delta \delta s \quad (14)$$

所以 T_s 主要影响振荡频率,而 T_D 主要影响系统机电振荡的稳定性。为保证阻尼控制的效果,要产生大的阻尼转矩, ΔB_{SVC} 需增加较大。而 ΔB_{SVC} 的增加会使 ΔV_m 变大,从而母线电压发生较大的振荡,影响电压控制效果。因此, SVC 的阻尼控制与电压控制存在矛盾,增强系统阻尼振荡的能力会降低电压的控制水平。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

文中采用 2 区域 4 机系统进行仿真,(如图 3 所示), SVC 装置安装于节点 8。

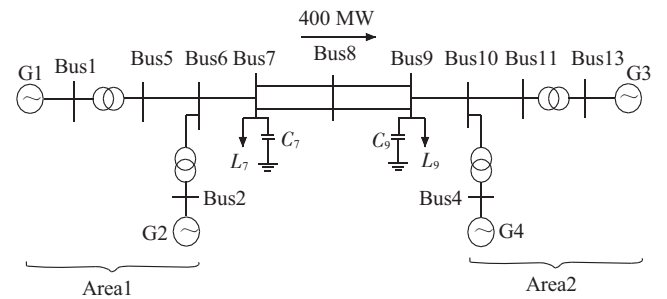


图3 2 区域 4 机系统接线

3.2 SVC 电压控制仿真

在仿真系统中加入 SVC,验证其对电压稳定控制的作用。仿真方案:节点 8 处 1.0 s 发生瞬时三相短路故障,1.1 s 故障解除。仿真时间为 30 s,安装 SVC 前后节点 8 电压幅值曲线如图 4 所示。

从图 4 的电压曲线可以看出,未安装 SVC 的情况下,故障消失后系统电压的波动比较大;而加装 SVC 后,系统电压波动有所减弱,并能较快达到稳定。

3.3 SVC 附加阻尼控制抑制低频振荡仿真

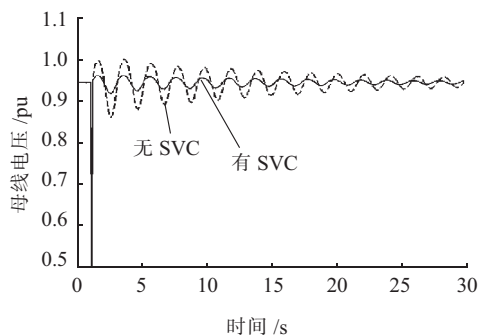


图4 瞬时故障母线8电压曲线对比

对系统进行小干扰稳定分析,发电机1、2和3、4区域间低频振荡模式特征根为 $-0.053\ 194 + j3.401\ 198$,其阻尼比小于2%,需要利用SVC的附加阻尼控制器进行抑制该低频振荡模式。在附加控制信号输入处输入一个区域振荡频率的正弦量,其频率与低频振荡模式相同, ω 为3.4016。分析由此信号引起的联络线上功率的振荡,通过对比得到滞后角 α 约为 88° 。由于两级滞后,附加控制器的超前滞后角 $\varphi=(180-\alpha)/2=46^\circ$ 。由此可得: t_1 为0.12s, t_2 为0.73s。

在系统中仿真验证SVC及其附加控制的阻尼效果。仿真方案:利用电力系统分析综合程序(PSASP)的小扰动分析功能,对不同控制情况下的系统进行小扰动稳定分析,得到低频振荡特征根的变化如表1所示。

表1 不同控制情况下的振荡阻尼比

控制方法	特征根	频率/Hz	阻尼比/%
无SVC	$-0.053\ 2 + j3.401\ 2$	0.541 317 5	1.563 8
SVC	$-0.060\ 6 + j6.596\ 7$	0.570 191 7	1.691 1
SVC(含附加阻尼)	$-0.181\ 1 + j3.188\ 3$	0.507 438 0	5.670 8

由表1可知,无附加阻尼控制的SVC对系统低频振荡的阻尼比基本没有影响;加装附加阻尼控制之后,阻尼比有明显提高,从1.56%左右提高到了5.67%。可见SVC加装附加阻尼控制器能更好地增加系统阻尼比,抑制低频振荡。

3.4 SVC附加阻尼控制对电压稳定的影响仿真

仿真方案:节点8在1.0s至1.1s间发生瞬时三相短路故障,仿真时间为30s,安装SVC前后节点8电压幅值曲线如图5所示。

对比可知,无SVC的情况下系统电压的波动比较大;在加装无附加控制的SVC后,系统电压波动有所减弱,特别在故障瞬间,电压有一个比较明显的上升过程;加装带有附加阻尼控制的SVC后,在故障消失开始一段时间,电压的波动比较大,甚至比未装SVC情况下的电压波动更大,这从前面的理论分析中也可看到,未装SVC时,三相短路发生后,电压瞬间降低到接

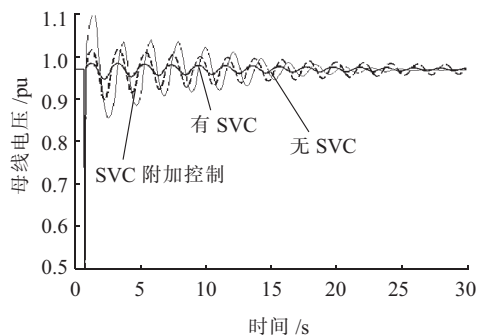


图5 节点8电压曲线对比

近0,当故障切除后,电压振荡回复到稳态。而加了附加阻尼控制后,其作用使电压波动变得更大。

从以上的现象看,SVC的电压控制与阻尼控制之间存在负的相互作用。

4 结束语

研究了SVC电压控制与抑制低频振荡功能之间可能存在的交互影响问题。在研究SVC的电压控制功能及SVC附加阻尼控制对电力系统低频振荡的抑制的基础上,明确了SVC按恒定电压控制方式运行时不能提供系统阻尼,只有附加阻尼控制才能向系统提供正阻尼。而附加阻尼控制提高系统阻尼的同时,理论上对电压控制的稳定性又有不利影响,从而得出SVC的两种控制功能间存在负的交互作用的结论。并在PSASP中进行了时域仿真,证明了SVC电压控制与阻尼控制间存在负的交互影响。

参考文献:

- [1] 邹振宇,江全元,张鹏翔,等. PSS与SVC多目标协调设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(4):66-70.
- [2] 刘宪林,王鑫. 单机-SVC-无穷大系统机电模式阻尼特性分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2007,8(3):89-90.
- [3] 栗春,姜齐荣,王仲鸿,等. 静止同步补偿器多目标协调控制器的设计[J]. 电工技术学报,1999,14(2):21-29.
- [4] 严伟佳,蒋平. 抑制区域间低频振荡的FACTS阻尼控制[J]. 高电压技术,2007,33(1):189-192.
- [5] 张彦魁,张焰. 静止无功补偿器建模及其在电压稳定研究中的应用[J]. 上海交通大学学报,2007,41(3):488-496.
- [6] 李林,康积涛,刘永江,等. 电力系统小扰动电压稳定性的研究现状及展望[J]. 电气技术,2010(6):6-8.
- [7] ABIDO M A, ABDEL-MAGID Y L. Analysis of Power System Stability Enhancement via Excitation and Facts-Based Stabilizers[J]. Electric Power Components and Systems, 2004,32(1):75-91.
- [8] LERCH E, POVH D, XU L. Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991,6(2):524-535.
- [9] 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.

布置还是集中布置;合并单元就地布置还是继电器小室布置;安装、调试、维护的合理性及方便性;经济性,如投资费用、节约占地、减少耗材及环保节能等。

结合工程实际情况,经过技术经济比较提出了符合该站的方案,为今后类似工程提供了很好的借鉴。

参考文献:

- [1] 兰金波,钱国明,季玮,等.无锡 220 kV 西泾智能变电站关键技术[J].江苏电机工程,2012,31(2):26-29.
- [2] 刘琳,王向平,沈斌.常规变电站智能化改造的技术探讨[J].华东电力,2011,39(8):1288-1290.
- [3] 范金华,卢波.500 kV 海宁变电站数字化方案研究与工程应用[J].华东电力,2009,37(6):907-909.
- [4] 葛遗莉,葛慧,鲁大勇.数字化变电站设计、运行中面临的问题[J].电力自动化设备,2010,30(12):113-116.
- [5] 黄建华,王佳.光学电流互感器的关键技术[J].电力自动化设

备,2009,29(12):94-97.

- [6] 刘震亚主编.国家电网公司输变电工程通用设计 110(66)~750 kV 智能变电站部分(2011 年版) [M].北京:中国电力出版社,2011.
- [7] Q/GDW 441—2010,智能变电站继电保护技术规范[S].
- [8] 电力规划设计总院.电网工程限额设计控制指标(2009 年水平) [M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

鲁东海(1981),男,湖北襄阳人,工程师,从事智能变电站设计工作;

苏麟(1980),男,四川泸州人,高级工程师,从事智能变电站设计工作;

娄悦(1983),女,江苏南京人,工程师,从事智能变电站设计工作。

Technical and Economic Comparison of With or Without Merging Unit in Smart Substations

LU Dong-hai, SU Lin, LOU Yue

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: It is necessary for analyzing and comparing the configuration scheme of with or without merging unit in smart substations based on practical engineering situation. Good energy efficiency and low engineering cost can be achieved because of a good configuration scheme. Due to the smart situation which applied conventional mutual inductors to sample, the advantage and shortage of the two schemes for merging unit are compared. According to the different locations of merging unit in smart substation, the influencing factors of with or without merging unit are illuminated. Finally, the detailed technical and economic index comparison of the two schemes are given based on a construction project of smart substation, and the reasonable suggestions on the choices of with or without merging unit are put forward.

Key words: smart substation; merging unit; with or without; technical index; economic index

(上接第 25 页)

作者简介:

王云洁(1988),女,江苏金坛人,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定分析;

胡弢(1986),男,江苏盐城人,硕士,从事电力系统运行控制工作。

Interaction Study of SVC Voltage Stability Control and Inhibiting of Low-frequency Oscillation

WANG Yun-jie¹, HU Tao²

(1. College of Electric Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224005, China)

Abstract: Static Var Compensator (SVC) can provide voltage support and improve voltage stability of power system. The additional damping control of SVC can improve the system's damping state to inhibit low-frequency oscillation. But there may be certain interaction between the two functions. The interaction between SVC voltage stability control and inhibiting of low-frequency oscillation in the one machine - infinity bus system is studied theoretically in this paper. Research shows that contradiction exist between SVC damping control and voltage control, enhance the system damping oscillation ability will sacrifice voltage quality. At last, a simulation using two-area four-machine system as an example, which verifies the SVC can effectively improve the voltage stability, adding additional controllers to effectively improve the system damping ratio, but the voltage stability becomes worse. The results and the theoretical analysis are consistent.

Key words: SVC; voltage stability; low-frequency oscillation; interaction