

静止无功补偿器对电力系统性能改善的综述

杜继伟¹, 王胜刚²

(1.四川省电力公司遂宁公司, 四川 遂宁 629000; 2.哈密电业局, 新疆 哈密 839000)

摘要: 随着电力电子技术、微处理技术和控制技术的发展, 柔性交流输电系统 FACTS (Flexible AC Transmission System) 的出现, 为电力系统急待解决问题提供了新的手段或策略。静止无功补偿器 (SVC) 作为 FACTS 家族的成员之一, 对电力系统性能的改善也已取得了可喜的成绩。因此, 从静止无功补偿器提高稳态输送容量、提高暂态稳定性、增强系统阻尼抑制低频振荡、缓解次同步谐振、预防电压不稳定或控制电压的波动、改善直流输电系统的性能等六个方面进行综述。

关键词: 静止无功补偿器; 电力系统; 性能

An overview on performance of power system improved by static var compensator (SVC)

DU Ji-wei¹, WANG Sheng-gang²

(1.Sichuan Power Company Suining Company, Suining 629000,China;

2.Hami Electric Power Bureau, Hami 839000,China)

Abstract: With the development of electric power technology, computer technology and control technology, the Flexible AC Transmission System (FACTS) appears which supply some new means to raise transmission capacity and improve power system stability. The static Var compensator (SVC) which is one of FACTS is an effective device to improve system performance, which has been proved. In recent years, the static Var compensator (SVC) is used extensively. Therefore, the effect of static Var compensator on power system is analyzed deeply. Some functions are elaborated in detail, such as raising transmission capacity, improving power system stability, strengthening system damping, relieving system sub-synchronous oscillation, preventing the voltage fluctuation, and optimizing HVDC transmission system performance.

Key words: static Var compensator (SVC); power system; performance

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0082-04

0 引言

随着电力电子技术、微处理技术和控制技术的发展, 柔性交流输电系统 FACTS (Flexible AC Transmission System) 的出现, 为电力系统急待解决问题提供了新的手段或策略^[1,2]。静止无功补偿器 (SVC) 作为 FACTS 家族的成员之一, 在提高电力系统传输容量和改善电力系统稳定性方面已在我国取得可喜的成绩。2004 年 11 月, 我国第一套用于电力系统中的国产化 SVC (100 var) 在东北电网鞍山红一变投运后, 使鞍山受电断面有功输送能力提高 4.4%。华中川渝系统正在设计和建设中的 4 台 SVC 的总容量为 570 Mvar, 建成后它们将使川渝断面稳定极限提高 180 Mvar, 鄂渝断面稳定极限提高 270 Mvar。因此, 较为详细、深入地了解静止无功补偿器 SVC (static Var compensator) 变得更

加必要, 本文将静止无功补偿器从不同方面改善电力系统性能进行介绍, 并就怎样改善电力系统的问题进行较为深入、全面的阐述。

1 静止无功补偿器对电力系统性能的改善

1.1 提高稳态输送容量

如图1所示, 从同步发电机到无穷大母线的输送功率为

$$P = \frac{E'_q V}{x} \sin \delta \quad (1)$$

假设 $E'_q = V$, 在无补偿的输电系统上, 稳态最大输送功率对应于 $\delta = 90^\circ$, 即

$$P_{\max} = \frac{E'_q V}{x} = \frac{V^2}{x} \quad (2)$$

设在输电线路的中点安装一个理想的 SVC (即无功无限制) 来补偿, 不管线路中的有功潮流有多

大,都能维持中点电压幅值恒定。因此,如图1(b)流过发电机与SVC母线之间半条线路的功率为

$$P = \frac{E'_q V_m}{x/2} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

另一半条线路上的功率也可类似表示。假设 $V_m = E'_q = V$, 因此输电线路上的最大功率为

$$P_{Cmax} = \frac{E'_q V}{x/2} = \frac{2V^2}{X} \quad (4)$$

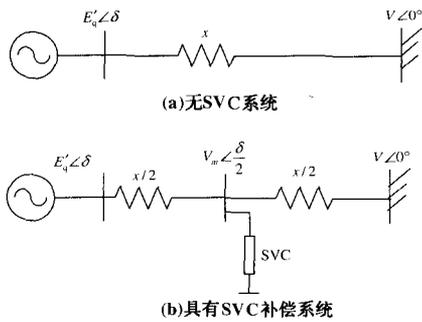


图 1 单机无穷大母线系统 (SMIB)

Fig.1 The single machine infinite system with SVC

装设理想SVC后,使最大传输功率增大为无SVC情况的2倍,并在 $\delta/2=90^\circ$ 时到达。也即是SVC可以使稳态功率极限加倍,并使同步电机与无穷大母线之间的稳定相角从 90° 增大到 180° , 如图2。

为了维持电压恒定,中点SVC提供的无功功率为^[9]

$$Q_{SVC} = \frac{4V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (5)$$

从图2可知,将输送功率加倍到2倍,SVC提供的无功容量为无SVC情况下最大输送功率的4倍。所以,SVC可以用来提高输电线路的输送能力,实际中还要受输电线路热稳定性限制^[7,8]。

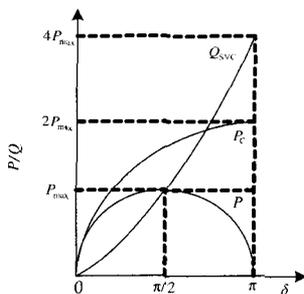


图2 SMIB系统中线路有功和SVC无功的变化

Fig.2 Line P and Q of the SMIB with SVC

1.2 提高暂态稳定性

当系统遭受突然的大扰动时,SVC也能够大大提高系统保持同步的能力。以图1的系统为例,设定

两系统传输功率相同,遭受同样的故障,持续时间也相同,两系统的转子角曲线如图3。

从图3可知,两系统在 δ_2, δ_{C2} 切除故障时, $P > P_M$, 发电机减速,但由于转子储能,转子角继续增大到 δ_3, δ_{C3} 。若 δ_3, δ_{C3} 分别小于 $\delta_{max}, \delta_{Cmax}$, 系统恢复稳定运行;若超出,则失稳。转子角的摆幅离最大极限越远(稳定裕度 $A_{margin} \ll A_{Cmargin}$), 系统的暂态稳定性越好,所以具有SVC的系统暂态稳定性得到很大提高。

另外,纯电压控制的SVC将提高同步转矩的系数,同步转矩的系数也提高即电力系统的暂态稳定裕度增大,暂态稳定性得到提高^[6,7,9]。

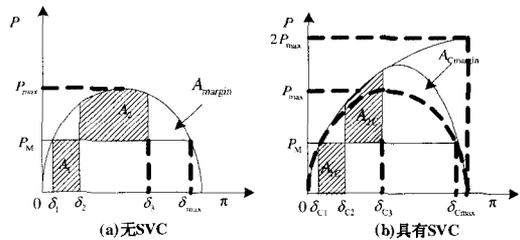


图3 SMIB中暂态稳定裕度的转子角曲线

Fig.3 δ of A_{margin} in the SMIB

1.3 增强系统的阻尼抑制低频振荡

发电机振荡的特性是由同步转矩和阻尼转矩决定,其中同步转矩是在系统遭受大的扰动时以保证各发电机转子角不变即保证系统暂态稳定,其大小决定于振荡的频率。而阻尼转矩影响振荡衰减的时间,即使系统稳定,阻尼转矩不足,振荡衰减时间很长。因此,通过采用适当的控制方法对SVC进行控制,可以增大系统的阻尼转矩。

以图1的系统来说明原理,假设 $E'_q = V, V_m$ 为SVC所要调节到的电压,流过发电机与SVC母线之间半条线路的功率为

$$P = \frac{V V_m}{x/2} \sin \frac{\delta}{2} \quad (6)$$

将式(6)线性化可得电功率的增量方程

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (7)$$

又因系统的摇摆方程为

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_M - P_E \quad (8)$$

对式(8)线性化后

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_M - \Delta P_E \quad (9)$$

当输入机械功率恒定时

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -\Delta P_E \quad (10)$$

当送端电压恒定时, $\Delta V=0$, 且将(7)代入(10)得,

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P}{\partial V_m} \Delta V_m + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (11)$$

式中: $\frac{\partial P}{\partial V_m} \Delta V_m$ 表示SVC的作用, 当SVC严格恒压调节时, $\Delta V_m=0$, 对应式(11)的根落在虚轴上, 导致转子角以频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial \delta}}|_0$ 作不衰减的振荡。

$\frac{\partial P}{\partial \delta}$ 为同步转矩系数。此时, SVC不向系统提供阻尼, 如对SVC不采用恒压控制, 而采用 $d(\Delta \delta)/dt$ 的某个函数来调制, 取 $\Delta V_m = kd(\Delta \delta)/dt$, 代入式(11),

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\partial P}{\partial V_m} k \frac{d \Delta \delta}{dt} + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta = 0 \quad (12)$$

对应的特征方程为:

$$S^2 + 2(k/M)(\partial P/\partial V_m)S + \omega_n^2 = 0 \quad (13)$$

式(13)的根在S平面的左半部分, 转子角的任何振荡都会随时间而衰减。从上面分析可知改善系统阻尼的一个有效信号是母线频率的变化量, 因为它与转子角振荡的关系为

$$d(\Delta \delta)/dt = \Delta f \quad (14)$$

SVC增加阻尼作用机理: 若 $d(\Delta \delta)/dt > 0$, 转子加速并积聚动能, 可以通过SVC的控制提高SVC端口电压来缓解动能的积聚; 若 $d(\Delta \delta)/dt < 0$, 转子减速, 发电机的输出功率必须被减下来, 这可以用阻尼控制作用减小SVC的端口电压来实现。

从上述分析可知, SVC的电压控制对其阻尼控制能力影响是负的, 即提高电压控制力度将降低阻尼控制能力; 又因电压控制向系统提供同步转矩, 从而提高系统的稳定极限的能力并不随电压控制强度的增加而增加, 所以在SVC中采用强的电压控制是得不偿失^[10~12]。

1.4 缓解次同步谐振 (SSR)

在IEEE Task Force Report中定义SSR为“串联电容补偿电输电电路自然频率接近于汽轮发电机组扭转自然频率的一个时, 即引起电气系统和机械系统间的强耦合现象就是SSR”^[8]。

在用SVC缓解SSR时(常常安装在机端), 选择发电机转速作为控制信号, 因为它包含了需要阻尼的所有原动机模式分量; 在谐振时SVC具有电流放大功能, 即如果SVC的无功电流被调制成与发电机转子速度偏差错相180°, 就能保证产生正阻尼, 也

即是若转子速度增加, SVC的无功电流就减小, 反之亦然。这种控制与提高输电能力而增强发电机阻尼控制是不同的。提高输电能力而引入的阻尼控制在惯性频率范围0.1~2Hz; 然而对抑制SSR的控制, 产生的在较高的扭转频率范围10~40Hz^[7]。

1.5 预防电压不稳定或控制电压的波动

SVC的电压调节作用如图4所示。

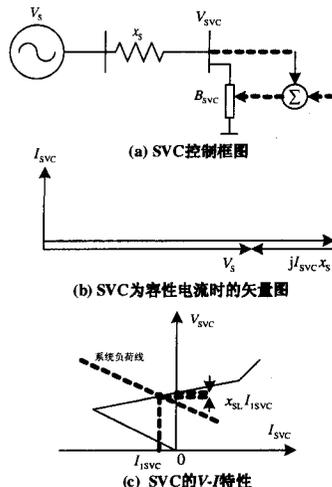


图 4 SVC的电压控制描述图

Fig. 4 Principle of voltage control on SVC

当SVC没有被电压调节时, SVC接入点的母线电压为(如图4(b))

$$V_s = V_{SVC} \angle 0 + I_{SVC} \angle 90 \cdot x_s \angle 90 = V_{SVC} - I_{SVC} \cdot x_s \quad (15)$$

所以SVC电流产生一个与 V_s 反相的电压降 $I_{SVC} \cdot x_s$, 式(15)表示系统负荷曲线方程。从式(15)也可知SVC在弱交流系统(x_s 大)比在强(x_s 小)交流系统中的电压控制效果好。

如图4(c), SVC动态特性曲线与系统负荷曲线的交点为SVC的稳定工作点, 所以区域内的电压控制作用如下

$$V_{SVC} = V_{ref} - I_{SVC} \cdot x_{SL} \quad (16)$$

当切除一条线路或诸如电动机等设备需求无功增加等原因导致电压波动或不稳定时, SVC都能成功地通过电压调节来实现稳定电压功能^[7]。

1.6 改善直流输电系统的性能

SVC应用到直流输电系统时对其性能从三个方面进行改善:

调节电压: 为了保持HVDC终端的额定电压, 需要无功功率支持, 此时使用SVC可以平滑、快速而没有开关次数限制地达到目的^[7]。

抑制暂态过电压: 当HVDC系统由于甩负荷而引起暂态过电压时, 安装有SVC的系统能很好地抑

制过电压。特别是使直流输电系统在薄弱的网络结构下具有更大的运行灵活性^[7,13]。

支持大扰动后的恢复:电力系统中的事故对直流输电系统的输送能力具有削弱作用,导致部分或全部甩负荷。SVC的主要作用是稳定电压,从而能够在故障切除以后极大地帮助直流输电系统的快速恢复。

2 结束语

(1) 随着电力系统规模的不断扩大,电力系统结构也越来越复杂,其各项性能(如稳定性、输送容量、电压稳定性等)指标也变得尤为重要。因此,必须采取不同措施来改变这些性能。比如采用先进的控制方式、FACTS、和一些现场试验等等。

(2) 针对 SVC 改善系统性能之间的关系,以及相互影响等还待进一步研究。如,在提供电压支持,加强系统稳定性的同时,是否也能抑制次同步振荡或是象串联补偿装置一样,在某些同步频率下诱发次同步振荡的隐患,等等问题还待进一步探讨。

(3) 本文就 SVC 对电力系统性能改善的机理深入分析,给工程设计、工程管理、现场维修等人员提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 何大愚. 柔性交流输电技术的定义、机遇及局限性[J]. 电网技术,1996, 6(20).
HE Da-yu. Flexibility AC Transmission Technology Definition, Opportunity and Limitation[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 6(20).
- [2] 韩英铎, 王仲鸿,等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术,智能控制,基于GPS的动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报(自然科学版),1997,37(7):1-6.
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, et al. Three New Front Subjects in Power Systems——FACTS, Intelligent Control and Dynamic Security Analysis and Monitor System Based on GPS[J]. Journal of Tsinghua University(Sci&Tech), 1997,37(7):1-6.
- [3] 何大愚. 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展——(CPST, IPC(TCIPC)、SSSC) [J]. 电力系统自动化,1997,37(7): 1-6.
HE Da-yu. FACTS Technology and New Progress in the Development of Its Controllers——TCPST, IPC(TCIPC) and SSSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997,37(7): 1-6.
- [4] 韩英铎, 严干贵, 姜齐荣, 等. 信息电力与 FACTS 及 DFACTS 技术[J]. 电力系统自动化, 2000, 24.
HAN Ying-duo, YAN Gan-gui, JIANG Qi-rong, et al. Electric Power in Information Society and FACTS&DFACTS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24.
- [5] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术的综述——模型、目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1993, 23(6): 1-7.
SUN Yuan-zhang, LIU Qian-jin. FACTS Control Technology Summary-model, Goal and Strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 23(6): 1-7.
- [6] 姜齐荣, 谢小荣, 等. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
JIANG Qi-rong, QI Xiao-rong, et al. Power System Parallel Compensates-structure, Principle, Control and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [7] Mathur R M, Varma R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Mathur R M, Varma R K. Based on Crystal Thyatron Flexibility AC Transmission Control Device[M]. XU Zheng, Trans. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [8] 何利铨, 邱国跃. 电力系统无功功率与有功功率控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1995.
HE Li-quan, QIU Guo-yue. Electrical Power System Reactive Power and Active Power Control[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1995.
- [9] Gyugyi L. Fundamentals of Thyristor-Controlled Static Var Compensators in Electric Power System Applications[A]. In: IEEE Special Publication 87TH 0187-5- PWR, Application of Static Var Systems for System Dynamic Performance[C]. 1987. 8-27.
- [10] 王海风, 李乃湖, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡(上)——理论分析[J]. 电网技术, 1996, 16(3).
WANG Hai-feng, LI Nai-hu, et al. Static Var Compensator in Damping Power System Oscillations Part I: Theoretical Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3).
- [11] 王海风, 李乃湖, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡(上)——研究实例[J]. 电网技术, 1996, 16(3).
WANG Hai-feng, LI Nai-hu, CHEN Heng, et al. Static Var Compensator in Damping Power System Oscillations Part II: Theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3).
- [12] Larsen E V, Chow J H, SVC Control Design Concepts for System Dynamic Performance[A]. In: IEEE Special Symposium on Application of Static VAR System for System Dynamic Performance[C]. New Orleans: 1987.
- [13] Thorvaldsson B, Arnlov B, Saethre E, et al. Joint Operation HVDC/SVC[A]. In: Proceedings of 6th International Conference on AC and DC Transmission[C]. London: 1996. 281-284.

收稿日期: 2007-04-18; 修回日期: 2007-05-25

作者简介:

杜继伟(1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统非线性控制、继电保护、及 FACTS; E-mail: Hunter_djw@163.com

王胜刚(1966-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、发电机励磁系统及电网无功补偿。