

SVC 与 STATCOM 的综合比较分析

周建丰¹, 顾亚琴², 韦寿祺¹

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 西门子电力自动化有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(STATCOM)都是无功补偿的重要装置,在输出特性、损耗、响应时间、谐振、谐波、控制方法、价格等方面对两者进行详细的比较分析,指出 STATCOM 作为一种新型的无功补偿装置比传统的 SVC 具有损耗小、响应速度快、不产生谐振、谐波含量少、能在一定范围内提供有功功率等优点。但 STATCOM 控制较复杂,且成本较高,在实际应用中应根据电网的具体要求选择或综合配置。

关键词: 电压质量; 静止无功补偿器; 静止同步补偿器; 无功补偿

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0057-04

0 引言

电压质量问题主要包括电压不平衡、电压闪变、电压波动、电压跌落等,其中由电压跌落引起的电能质量问题最为严重,约占 80 % 以上^[1-3]。静止无功补偿器 SVC(Static Var Compensator)和静止同步补偿器 STATCOM(Static synchronous Compensator)采用电力电子开关器件,能够快速调节注入系统的无功电流,是保证动态电压支撑强有力的手段。同时,当系统安装 SVC 或 STATCOM 后,可减小系统电气距离,起阻尼系统振荡、抑制过电压、提高功率因数等作用^[3]。

SVC 是目前应用较普遍的无功补偿装置,技术比较成熟,通过控制晶闸管的开通来改变阻抗特性,从而提供大小不等的无功功率。而 STATCOM 是最近发展的新型无功补偿装置,通过控制可关断

器件的通断来向系统提供无功。笔者对 SVC 和 STATCOM 的输出特性、损耗、响应时间、谐波、谐振、控制方法、价格等方面进行较全面的比较分析,有利于在实际应用中根据电网的具体要求选择合适的补偿设备,或综合两者的优点,更好地改善电网性能。

1 SVC 与 STATCOM 比较分析

1.1 输出特性比较

SVC 装置是通过改变电抗来调节其输出的无功功率,可以等效为可控电抗器,SVC 装置输出的无功功率与系统电压的平方成正比,也即其输出的无功电流与系统电压成正比,因此在电力系统电压下降时,SVC 装置输出的无功功率会以与系统电压下降平方的比例下降^[1,4]。它所能提供的最大电流分别受其并联电抗器和并联电容器的阻抗特性限制,因而随着电压下降而减小。

STATCOM 输出的无功功率与系统电压成正比例,也即其输出的无功电流与系统电压无关,因此当

收稿日期:2006-11-27;修回日期:2007-06-12

系统电压下降时,STATCOM 可以调整其变流器交流侧电压的幅值和相位,以使其所能提供的最大无功电流 I_{Cmax} 和 I_{Lmax} 维持不变,仅受电力半导体器件的电流容量限制。所以在系统电压下降时,STATCOM 输出无功的能力比 SVC 强,而在系统电压升高时,STATCOM 吸收无功的能力比 SVC 弱。电力系统中,因为系统出现故障后的动态过程中主要出现的问题之一是电压降低,因此同容量的 STATCOM 装置的无功功率特性比同容量的 SVC 装置好。

图 1 为 SVC 装置与 STATCOM 装置输出的无功—电流特性(U 为系统电压, U_{ref} 为系统电压基准值, I_Q 为无功电流, I_{Lmax} 、 I_{Cmax} 分别为最大感性和容性无功电流)。由图 1 可见, STATCOM 的运行范围比传统 SVC 大, SVC 的运行范围是向下收缩的三角形区域,而且 STATCOM 的运行范围是上下等宽的近似矩形的区域。

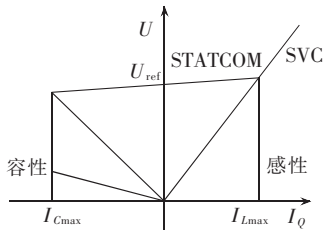


图 1 SVC 装置与 STATCOM 装置的无功—电流特性

Fig.1 Var-current characteristics of SVC and STATCOM

SVC 或 STATCOM 在系统故障情况下向系统注入无功电流,装置容量的大小由需要提高的系统稳定水平决定^[5]。假定两者具有相同的额定容量,设为 Q_N ,额定电压为 U_N ,SVC 等效导纳为 B_{SVC} ,STATCOM 提供的无功电流为 I_{Q0} 。

对于直接与系统并联的 SVC,有 $Q_{SVC} = U_N^2 B_{SVC}$;对于 STATCOM,有 $Q_{STATCOM} = U_N I_{Q0}$ 。

正常情况下,装置接入点的系统电压是 U_N ,在故障情况下系统电压跌落到 U'_S ,由此可求出 SVC 能提供的最大无功为 $Q_{SVC}^{max} = U'^2_S Q_N / U_N^2$,而 STATCOM 能提供的最大无功为 $Q_{STATCOM}^{max} = U'_S Q_N / U_N$ 。

说明在系统发生短路故障电压跌落时, STATCOM 可以比 SVC 提供更多的无功以维持系统电压稳定;在系统发生过电压时,STATCOM 比 SVC 吸收的无功功率多。对于同一个 2 条馈线的配电系统,选取同等容量的 SVC 和 STATCOM,比较发生故障之后装置对于系统电压的维持能力。在 0.2 s 的时候其中一条馈线发生三相短路故障,系统电压突降到 0.5 p.u.,故障持续 0.1 s 后切除。

图 2 和图 3 为 SVC 和 STATCOM 安装后,故障时系统电压和注入系统电流的仿真结果。图中可

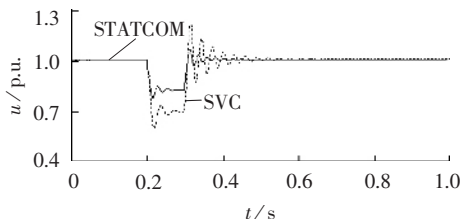


图 2 SVC 和 STATCOM 安装后系统电压曲线

Fig.2 System voltages with SVC and STATCOM

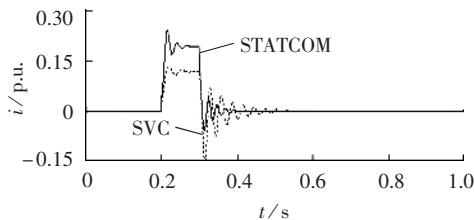


图 3 SVC 和 STATCOM 注入系统电流曲线

Fig.3 Currents injected by SVC and STATCOM

以看出,相同容量的 STATCOM 比 SVC 更能加快电压恢复速度,能提供更多的无功电流,有利于维持系统电压,使系统可以安全过渡到另外一个状态。SVC 在故障切除之后,由于电容器两端的电压会与系统电压叠加,从而产生较大的过电压,对继电保护有很大的影响。

1.2 损耗比较

在选择无功补偿装置时,有功损耗是一个重要的因素,因为损耗一直存在,其费用随着时间推移可以累积到很高的水平^[6-7]。

图 4 为 FC-TCR 和 STATCOM 的损耗特性图。FC-TCR(Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor)是一种固定电容-晶闸管控制电抗型 SVC。SVC 的损耗主要包括 3 个部分:固定电容器或滤波网络的损耗,这是固定损耗,比较小;晶闸管控制电抗(TCR)支路中电抗器的损耗,与支路电流的平方近似成正比关系;晶闸管损耗,包括触发电路损耗、开通和关断损耗、通态和阻态损耗等,近似可认为与支路电流成正比关系。因而总的损耗随着输出感性无功的增加而增加,随着容性无功的增加而减小,即当装置处于浮空状态,输出无功为零时,也存在一定的损耗。

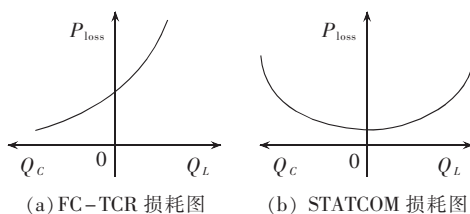


图 4 FC-TCR 和 STATCOM 的损耗特性

Fig.4 Loss characteristics of FC-TCR and STATCOM

STATCOM 装置既存在并联损耗,也存在串联损耗^[3]。并联损耗与直流侧电容电压的平方成正比,串联损耗包括变压器铜耗和可关断器件、二极管等的损耗。由于 STATCOM 能吸收的最大感性和容性无功是相等的,其损耗是对称的。在浮空状态下的损耗是最小的。STATCOM 的功率损耗比同容量的 SVC 至少低 2%。

1.3 响应时间

SVC 装置中的 TCR 部分采用不可关断晶闸管,一旦晶闸管导通,必须等电流过零才能自然关断,因此 SVC 控制系统发出指令到晶闸管响应最大的延时为 10 ms(半个周期),加上 TCR 本身的过渡过程,整个 SVC 装置的响应时间约为 50~60 ms^[2]。

STATCOM 装置为可控电流源加串联电阻和电感支路构成,装置的固有时间常数主要由 RL 支路的时间常数决定,计及 STATCOM 直流侧电容充放电的时间,则 STATCOM 的时间常数可近似为直流侧电容的充放电时间与 RL 支路的时间常数之和。通常情况下,直流侧电容中储存的能量变化很小,与 RL 支路的时间常数比较起来可以忽略。STATCOM 瞬时无功变化的响应时间约为时间常数的 3~4 倍。对于大容量 STATCOM 装置,其固有的时间常数为几毫秒,因此 STATCOM 的响应时间为 20~30 ms^[3]。

最快的基于 PWM 调制的 STATCOM 装置,响应时间约为 10 ms。因此,SVC 装置和 STATCOM 装置响应速度很快,但 STATCOM 装置响应速度更快^[6]。

1.4 谐振特性比较

SVC 装置是电抗型的,接入电力系统可能会改变原电力系统的阻抗特性,因此如果在电力系统中某些节点安装 SVC 装置,除研究 SVC 装置投入后对提高系统安全稳定作用外,还必须详细研究系统在 SVC 装置接入前后阻抗特性的变化,防止 SVC 装置接入后因改变系统阻抗特性导致出现谐振,在 SVC 工程实践过程中曾经出现安装 SVC 装置后系统出现谐振的例子^[3]。特别是电力系统安装多台 SVC 装置后更容易出现谐振问题,因此必须予以考虑。而 STATCOM 装置可以等效为可控的电流源,接入系统后不会改变系统的阻抗特性,不存在谐振问题。

1.5 谐波特性比较

SVC 装置中的 TCR 部分通过晶闸管的开通,只要控制角不为零,流过电抗器电流就不是正弦波,会有大量的谐波注入电网,必须采取措施将这些谐波消除或减弱。从电路结构看,可以采取多脉冲结构和顺序控制来抑制谐波^[8-9]。但如果出现各种不平衡和不对称状态,则必须配置滤波器来减少注入系统的谐波电流。

STATCOM 装置的输出电压也不是正弦波,存在很大的奇次谐波,会造成谐波污染。可以采用桥式变流电路的多重化技术、多电平技术或链式结构以消除较低次的谐波,并使高次谐波减小到可以接受的程度,一般不需要安装滤波器。采用这些措施,不仅可以消除谐波,还可以提高电压等级和装置容量。

1.6 控制方式比较

从控制策略角度看,STATCOM 与 SVC 是完全一样的。不同的是,SVC 是通过改变晶闸管的触发角来改变装置的等效电纳。而 STATCOM 是对装置输出电压的幅值和相位的快速调节,来控制 STATCOM 输出无功电流的^[10]。

SVC 的无功电流和外部电压对外部网络较为敏感,而 STATCOM 对外部网络的运行条件和系统结构是不敏感的。在外部系统容量和补偿装置通常的数量级不可比时,SVC 会变得不稳定^[11-13]。

1.7 其他方面比较

SVC 装置采用电容器、电抗器作为无功补偿器件,因此需要较大容量的电容器和电抗器,占地面积

比较大;STATCOM 接入电网的连接电抗,其作用是滤除电流中可能存在的较高次谐波,另外起到将变流器和电网这 2 个交流电压源连接起来的作用,因此所需的电感值并不大,也远小于补偿容量相同的 TCR 等 SVC 装置所需的电感量。如果使用降压变压器的漏抗,所需的连接电抗器将进一步减小,因此占地面积小^[14]。SVC 装置采用一般的晶闸管而 STATCOM 装置采用门极可关断晶闸管或其他可关断器件,而可关断器件的价格比较昂贵,因此到目前为止同容量的 STATCOM 装置的成本比 SVC 高。这是目前 SVC 装置应用普遍而 STATCOM 装置只在某些要求较高的场合应用的一个重要原因^[15-16]。

STATCOM 能够在一定的范围内提供有功功率,减少有功功率的冲击。而 SVC 只能够提供无功功率,不具备提供有功功率的功能。SVC 装置中 TCR 部分通过电抗器实现无功补偿,电磁噪声很大。而 STATCOM 通过逆变器实现无功补偿,运行过程中电磁噪声显著降低。

2 结论

SVC 和 STATCOM 都可以对无功功率进行控制,可以有效维持系统电压稳定,提高系统功率因数等。相比之下,STATCOM 有着明显的优越性。除了在维持电压稳定的能力强之外,STATCOM 在浮空状态下的损耗很小、响应时间短、不会产生谐振、产生谐波含量少、所需电容器和电抗器容量小、占地面积小、能在一定范围内提供有功功率,以及运行过程中电磁噪声很低。但是,STATCOM 控制比较复杂,而且成本比较高。随着电力系统的发展,STATCOM 的应用前景将会更加广阔。

参考文献:

- [1] TAN Y L. Analysis of line compensation by shunt-connected FACTS controllers: a comparison between SVC and STATCOM [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(8): 57-58.
- [2] NOROOZIAN M, PETERSSON N A, THORVALDSON B, et al. Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application [C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, USA; IEEE/PES, 2003: 957-958.
- [3] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统无功补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 冯煜理, 陈陈. 静止同步补偿器与传统静止无功补偿器的比较与分析[J]. 华东电力, 2005, 33(9): 16-19.
FENG Yu-cheng, CHEN Chen. Comparison and analysis between static synchronous compensator and traditional static var compensator[J]. Power of East China, 2005, 33(9): 16-19.
- [6] CHEN Jian-ye, SONG Shan, WANG Zan-ji. Analysis and implementation of thyristor-based STATCOM [C] // International Conference on Power System Technology. Chongqing, China; IEEE/PES, 2006: 1-5.
- [7] 陆达, 刘本国. 静止型 TCR 无功补偿器的控制原理及其控制方法分析[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 26-27, 31.

- LU Da, LIU Ben - guo. Typical control principle and control method analysis of TCR [J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 26-27, 31.
- [8] 刘皓明, 戚庆茹, 李扬, 等. 中点钳位式三电平 STATCOM 的动态相量建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 18-22.
- LIU Hao-ming, QI Qing-ru, LI Yang, et al. Modeling and simulation of STATCOM system based on 3-level NPC inverter using dynamic phasors [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 18-22.
- [9] VORAPHONPIPUT N, CHATRATANA S. STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Dalian, China: IEEE/PES, 2005: 1-6.
- [10] WILKOSZ K, SOBIERAJSKI M, KWASNICKI W. The analysis of harmonic generation of SVC and STATCOM by EMTDC / PSCAD simulations [C]//Proceedings 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece: IEEE, 1998: 853-858.
- [11] 欧开健. STATCOM 直流侧电容值对系统谐波含量和电容电压波动幅值的影响及其选择[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 6-9.
- OU Kai-jian. Effect of STATCOM DC capacitor on harmonic distortion and voltage fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 6-9.
- [12] MITHULANANTHAN N, CANIZARES C A, REEVE J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 786-792.
- [13] 郭锐, 刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 21-24.
- GUO Rui, LIU Guo-hai. Study on STATCOM model and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 21-24.
- [14] 刘文华, 姜齐荣, 梁旭, 等. ± 20 Mvar STATCOM 的工业现场测试及试运行[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 43-46.
- LIU Wen-hua, JIANG Qi-rong, LIANG Xu, et al. Field test and operation of ± 20 Mvar STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 43-46.
- [15] 宋珊, 陈建业. 基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 49-54.
- SONG Shan, CHEN Jian-ye. Theory and prototype verification of thyristor based STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 49-54.
- [16] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 1-5.
- WANG Zhong-hong, SHEN Fei, WU Tie-zheng. FACTS applications in China and its developing trends[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 1-5.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

周建丰(1977-), 男, 浙江衢州人, 硕士, 研究方向为无功补偿技术(E-mail: tjutee@126.com);

顾亚琴(1982-), 女, 江苏南通人, 硕士, 研究方向为电能质量及继电保护;

韦寿祺(1964-), 男, 广西贵港人, 副教授, 研究方向为电力电子技术和电力机械。

Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM

ZHOU Jian-feng¹, GU Ya-qin², WEI Shou-qi¹

(1. Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Siemens Power Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Both SVC(Static Var Compensators) and STATCOM(STATIC synchronous COMPensator) are important equipment of reactive compensation, which are comprehensively compared in output characteristics, loss, response time, resonance, harmonics, control method and price. It is pointed out that, as a new kind of var compensation equipment, STATCOM has less loss, fast response, no resonance, less harmonics, more complicated control and higher cost, and supplies active power at a certain range. Their configuration in power grid depends on the actual applications.

Key words: voltage quality; SVC; STATCOM; reactive compensation