

基于风电场并网技术的静止无功补偿器与静止同步发生器的部分性能比较

孙 旭

(淮安供电公司, 江苏 淮安 223002)

摘 要: 静止无功补偿器 (SVC) 和静止同步发生器 (STATCOM) 是 2 种常见可以应用于风电系统的新型柔性交流技术装置, 在提高风电场电压稳定性、响应时间、谐波分析、能量损耗、经济性等方面对 STATCOM 和 SVC 进行了比较, 得出 STATCOM 较 SVC 更适合运用风电场。

关键词: 风电场; 静止同步发生器; 静止无功补偿器; 电压质量

0 引言

随着风电系统越来越广泛地并入电网, 对电力系统将产生不小的影响。风电并网对电网电压的影响主要有电压波动、电压闪变、电压畸变、电压不平衡、瞬态电压波动等; 对电能质量的影响除了前面提到的电压波动和闪变外, 还有风电机组中大量的电力电子装置引起的谐波污染; 由于风速的随机性造成风力发电出现不稳定性和难以预测性使系统出现了频率波动; 此外, 风电并网还会对系统的继电保护产生影响。这些影响也是制约风电大规模接入电网的主要因素。目前采用的解决措施主要有: 采用电池储能系统 (BESS)、无功补偿装置、滤波器等。其中作为 FACTS (柔性交流技术) 主要组成部分的静止同步发生器 (STATCOM) 和静止无功补偿器 (SVC) 可以灵活地对系统进行无功补偿。本文针对风电场并网特点对 STATCOM 和 SVC 进行了从控制方法、响应时间、谐波产生、能量损耗等方面进行了探讨。

1 静止无功补偿器和静止同步发生器在现在电网中的应用

1.1 静止无功补偿器和静止同步发生器

基于电力电子技术发展起来的静止同步发生器 (STATCOM) 和静止无功补偿装置 (SVC) 作为 FACTS (柔性交流输电技术) 的重要组成部分, 是对无功功率进行动态补偿两种典型的有效方法。静止无功补偿器能够快速调节无功功率且维持负荷连接点电压水平稳定, 有效抑制电压波动、闪

变、高次谐波等。SVC 由可控硅支路和固定 (或可变) 电容器支路并联而成, 分为 4 种类型: ①可控硅阀控制空心电抗器型 (TCR 型); ②可控硅开关控制电容器型 (TSC 型); ③自饱和电抗器型 (TSR 型); ④可控硅阀控制高阻抗变压器型 (TCT 型), 其中 TCR 型具有反应时间快、运行可靠、无级补偿、适用范围广等优点^[4]。目前在电力系统的实际应用中大多采用 TCR 型 SVC, 其典型结构图如图 1 所示。SVC 属于并联无功补偿装置, 控制方法为通过控制晶闸管的触发角来改变接入电网中的等效点纳, 以达到调节输出无功的目的。SVC 的控制框图如图 3 所示, 其中图中 K_1 为放大倍数, U_{ref} 为被控节点参考电压, α_0 为稳态时晶闸管的触发角, T_1 , T_2 , T_3 为时间常数, $\alpha_{max}\alpha_{min}$ 为触发角的最大值和最小值^[11]。

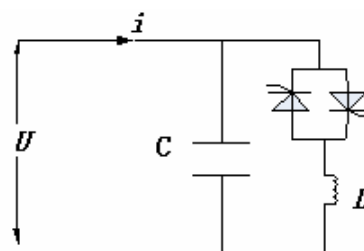


图 1 TCR 型 SVC 典型结构图

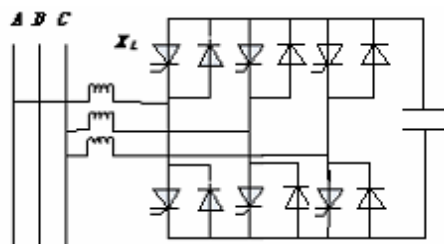


图 2 电压型 STATCOM 电路基本结构

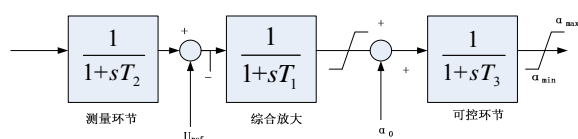


图3 SVC控制框图

静止同步发生器是建立在SVC基础上并采用了GTO(可关断晶闸管),IGBT(六单元绝缘栅双极型晶闸管)等大功率全控型器件,因此能更快速,更有效地补偿系统中的无功功率。STATCOM的基本工作原理是将自换相桥式电路,通过电抗器或者直接并联在电网上,适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值,或者直接控制其交流侧电流使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流,从而实现动态无功补偿的目的^[5]。

STATCOM分为电压型和电流型两种,直流侧分别采用电容器和电感器作为储能原件,在实际运行中,由于电压型STATCOM运行效率较高而被广泛使用。其结构简单、能量损耗小、成本低而且易于控制。如图2所示。

STATCOM的控制方法有:①基于比例调节的电压控制方法;②基于PI调节的无功控制方法;③基于电流的控制方法。其中基于比例调节的电压控制方法和基于PI调节的无功控制方法为传统方法,不能充分利用STATCOM装置的快速性和精准性。STATCOM基于电流控制的方法又可以分为电流直接控制和电流间接控制方法,其中电流间接控制方法是通过控制电网电压与STATCOM输出电压夹角的大小来达到控制输出电流大小和相位的作用。但是,由此方法输出的电流是方波,所含谐波量较大,必须采用多电平技术或多重化方法来减少谐波含量,因此采用电流间接控制法的装置一般比较复杂,经济性不好。电流直接控制则采用跟踪型PWM控制技术对电流波形的瞬时值进行反馈控制,由于直接对电流的瞬时值进行跟踪控制而不需要经过中间环节,因此,其响应速度快、控制精度高。但是由于采用PWM技术,因此要求变流器的全控型器件有较高的开关频率,这对较大容量的STATCOM来说还难以做到^[10]。

1.2 两种装置在现在电网中的应用

随着整流器、变频装置、电弧等非线性、冲击性负荷在现在配电网中的广泛应用,不仅吸收大量的无功功率,同时还引起电压的波动和闪变。

SVC和STATCOM应用于配电网中主要起改善系统电压稳定性改善配电网电能质量的作用。如图4所示为STATCOM应用于配电网中的示意图,其中 U_S 为系统电压; U 为负荷端电压; R_S, X_S 分别为系统的电阻和电抗^[10]。

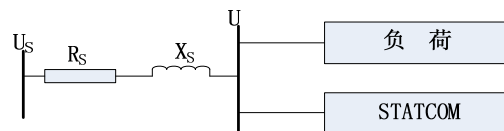


图4 STATCOM的应用接线图

在风电并网的电力系统中,由于风力发电具有随机性、波动性特征,且在运行中必须吸收大量无功,可能会造成电网电压偏差、电压波动和闪变、谐波以及周期性电压脉动等。SVC和STATCOM可以应用于风电场中以改善风电并网系统的电能质量。图5所示为STATCOM接入风电并网系统的位置。

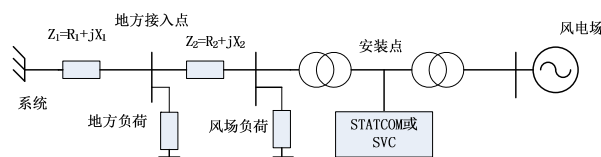


图5 STATCOM或SVC接入电网示意图

在电气化电路中,由于目前电力机车大多数采用相控整流,机车功率大、速度变化频繁,并且位置在不断变化,因此,电气化铁路供电系统的功率因数低、谐波含量高、负序电流大。在副边牵引电网侧采用SVC或STATCOM补偿方案,不仅能稳定牵引电网的电压,保证牵引电网供电的安全可靠性,还可以提高电铁负荷的功率因数、滤除低次谐波、消除负序电流的影响^[4]。

2 静止无功补偿装置和静止同步装置应用于风电场中的性能比较

目前风电并网系统中广泛应用的主要是SVC装置,应用新型无功补偿装置STATCOM则较少。然而针对风电特点和并网后对电力系统的影响来看,STATCOM相较于SVC则有显著的优势,如装置的响应时间、运行范围、谐波的产生、损耗等特性。

2.1 响应时间

由于风的不可预测性和风速的随机性和间歇

性,要求风电系统应采用灵活、快速的无功补偿装置。张红等提出了由于SVC装置晶闸管控制电抗器TCR部分采用不可关断晶闸管,一旦晶闸管导通,必须等电流为零才能自然关断,因此SVC控制系统发出指令到晶闸管响应最大的延时为 10ms(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 50~60ms。而STATCOM装置为可控电流源,其延时主要是装置的固有时间常数造成,因此响应时间为 20~30ms,最快的基于脉宽调制PWM的STATCOM装置响应速度可以在 10ms左右,虽然SVC与STATCOM装置响应速度都很快,但是STATCOM装置响应速度更快些。对于相同配电系统,分别采用STATCOM和SVC对其进行仿真,仿真结果如图 6 所示,可以看出,STATCOM比SVC对系统的响应速度上更快一些^[6]。

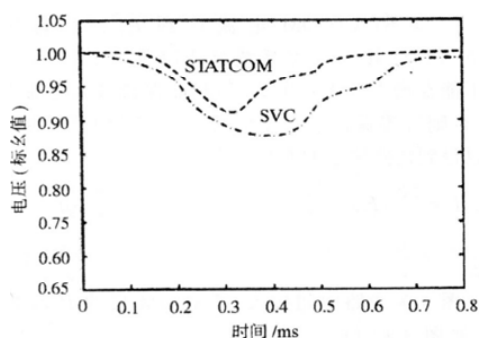


图 6 STATCOM 装置与 SVC 装置的响应时间比较

2.2 运行范围

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^[7]。这对复杂多变的风电系统中的无功补偿有至关重要的意义。

在系统无功补偿装置装设点对无功功率的需用超出其额定容量时,STATCOM退化为恒定的电流源,装置输出的无功功率随系统的电压成正比例,即输出的无功电流与系统电压无关。而SVC退化为电容器或者电抗器,SVC装置输出的无功功率与系统的电压平方成正比,因此在电力系统电压降低时,SVC装置输出的无功功率随系统电压平方降低的比例而下降^[7]。因此当风电并网的系统出现故障后的动态过程中出现的电压降低,STATCOM装置的无功功率特性比同容量的SVC装置要好。如图 7 所示。

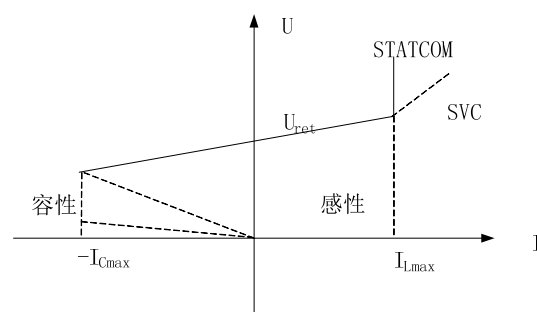


图 7 STATCOM装置与SVC装置无功电流电压特性比较

实际运行中,风电场接入电力系统引起的电压波动和闪变问题实际上不仅与无功补偿有关,还与风电机组发出的有功有关。韩洪等提出STATCOM的直流侧采用较大的储能电容,或者其它直流电源(如蓄电池组)时,其不仅可调节系统的无功功率,还可调节系统的有功功率。这对电网来说是非常有益的,这是SVC装置所不能比拟的^[5]。

2.3 产生谐波比较

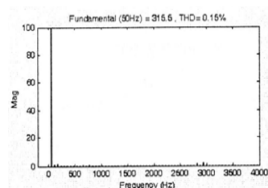
风电机组本身运行时要采用大量的电力电子元件,所以会产生谐波。同时用于风电机组无功补偿的STATCOM和SVC也会产生一定量的谐波,所以从电能质量上考虑,希望无功补偿装置产生的谐波量少。

STATCOM在无功补偿的时候,虽然交流侧输出的幅值等于直流侧电容电压的方波序列,不是正弦交流波交流电压,不可避免会产生谐波分量,但STATCOM是采用电力电子逆变技术的无功补偿方法,通过电路结构和脉冲触发方式可有效抑制输出电压和输出电流中的谐波成分,或采用桥式交流电路的多重化技术、多电平技术或PWM技术来进行处理,消除次数较低的谐波,因此谐波发生量小。

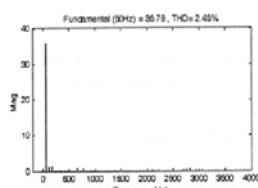
而以TCR型SVC为例,由于晶闸管的非全开通,必然产生谐波,5、7次特征谐波量比较大,占基波值的5%~8%,非特征的3次谐波发生量也时常发生,给SVC系统滤波器设计带来困难^[4]。周建丰等提出从电路结构看,可以采取多脉冲结构和顺序控制来抑制谐波。但是如果出现各种不平衡和不对称状态,则必须配置滤波器来减少诸如系统的谐波电流^[7]。

分别采用STATCOM与SVC作为系统补偿装置,分析比较谐波,如图 8 所示可以看出STATCOM作为补偿装置的系统电压和电流的畸变

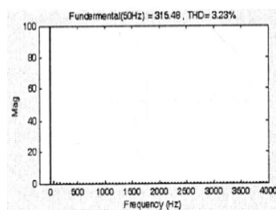
率低于采用SVC的系统，STATCOM有效抑制并消除了谐波^[6]。



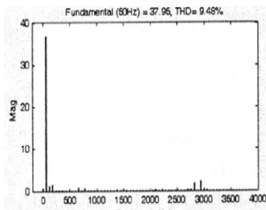
图a STATCOM的电压幅频特性



图b STATCOM的电流幅频特性



图c SVC的电压幅频特性



图d SVC的电流幅频特性

图8 系统采用STATCOM与SVC时的电压电流谐波比较

2.4 损耗比较

不管在风电系统还是其它电力系统选择无功补偿装置时，需要注意的一个重要因素便是有功损耗，短期内其影响不会明显，但因为有功损耗一直存在，其费用会随着时间的推移积累到很高水平。

STATCOM装置既存在并联损耗，又存在串联损耗。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损耗和可关断器件，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。

而SVC的损耗主要包括3个部分：固定电容器或铝箔网络的损耗，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。比较如图9所示。由比较可知，STATCOM的功率损耗比同容量的SVC至少低2%。

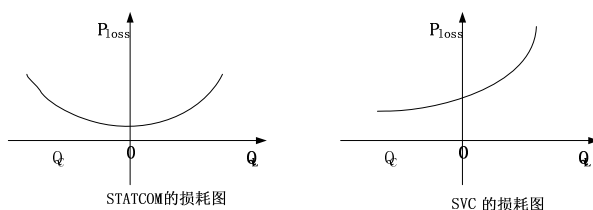


图9 STATCOM与SVC的损耗特性

2.5 其它方面比较

1) 谐振特性比较

由于SVC装置属于电抗型，其接入电力系统可能会改变源电力系统的阻抗特性。在风电系统某些节点安装SVC装置后由于前后阻抗特性的变化可能出现谐振。在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。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，所以不存在谐振问题。

2) 灵活性

SVC装置需要大容量的交流电容器和电抗器，成套SVC装置占地面积较大；而STATCOM则无须大容量的交流电容器和电抗器，占地面积较小。根据工程经验，同容量的STATCOM装置占地面积仅为SVC装置的1/3左右。由于STATCOM装置的体积小，还可以考虑将STATCOM装置变为可移动式装置，配置起来更加灵活。

3) 经济性比较

由于STATCOM装置采用的GTO、IGBT等电力电子器件要比传统的电容电感价格高许多，因此STATCOM为了消除谐波所采用的变压器曲折连接或其他连接方式费用也相当高，所以相同容量的STATCOM装置要比SVC更昂贵^[6]。由于国内的STATCOM还未产业化生产，所以将来随着FACTS技术的发展STATCOM装置的价格会降低。

d) 电磁噪声

由于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^[7]。

综上，可以得出表1。

表1 STATOM与SVC装置的性能特性比较

	控制方法	响应速度	运行范围	产生谐波	损耗比较	谐振特性	灵活性	经济性	噪声
				特殊情况					
SVC	简单	较快	较大	可能很大	较小	可能出现	低	好	大
STATCOM	复杂	快	大	较大	小	不会出现	高	较好	小

3 结论

STATCOM和SVC装置都可以对风电场并入电网系统的无功功率进行控制，维持风电系统电压

稳定,提高系统的功率因数等。但是相比较之下,STATCOM 有着明显的优越性。除了能够快速响应之外,STATCOM 在特定的控制方式下可以调节风电系统的有功功率,STATCOM 在浮空状态下的损耗很小、产生谐波含量少、所需电容器和电抗器容量小、占地面积小、运行过程中电磁噪声很低等。但是不得不承认 STATCOM 控制比较复杂,而且成本比较高,目前广范在风电系统中应用的主要还是 SVC 装置。随着电力电子技术的发展和风电技术的发展,STATCOM 会有更加广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴满,王琪,刘劲松. STATCOM 的维持风电系统电压稳定性的研究[J].东北电力技术,2008(5):12-15.
- [2] 刘振伟.风电并网影响及最大装机容量研究[D].湖北:华中科技大学,2007:1-29.
- [3] 袁莹.用于风力发电系统电压稳定控制 SVC 研究[D].西安:西安理工大学,2010:1-6.
- [4] 翁利民,靳建峰. STATCOM 与 SVC 的性能比较与应用分析[J].电力电容与无功补偿,2010,31(4):1-4.
- [5] 韩洪.含 STATCOM 的风电场电压稳定性研究[D].山东:山东大学,2009:14-19.
- [6] 张红,谭万禹,史春城,等. STATCOM 与 SVC 在电力系统运行中的比较分析[J].吉林电力,2009,37(3):24-27.
- [7] 周建丰,顾亚琴,韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J].电力自动化设备,2007,27(12):57-60.
- [8] 熊来红,刘会金.静止同步补偿器建模及改善配电网电能质量仿真分析[J].科技综述,2010,45(5):45-49.
- [9] 付智明,陶金,杨燕. STATCOM 无功补偿装置的实际应用[J].江西电力技术学院学报,2006,19(1):34-35.
- [10] 刘方蓝,林莉,牟道槐. STATCOM 抑制电压波动和闪变的分析[J].2007,30(2):34-36.
- [11] 闫广新,刘新钢,李江. SVC 对并网型风电场运行性能的影响分析[J].2010,26(9):54-57.
- [12] 闫从逊.新型静止同步补偿器 STATCOM 的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2008:1-17.
- [13] 周雪松,张书瑞,马幼捷.静止同步补偿器(STATCOM)原理及性能分析研究[J].机械设计与制造,2009(12):37-39.
- [14] 林媛媛,刘建辉. STATCOM 用于抑制电压跌落研究[J].辽宁工程技术大学学报,2010(5):88-90.
- [15] 顾威,李兴源,魏巍.用 SVC 和 STATCOM 改善风力发电动态性的仿真比较[J].电网与清洁能源,2009(11):70-75.

作者简介:

孙旭(1989—),女,江苏淮安人,初级职称,从事电力营销工作。