

文章编号:1671-251X(2012)09-0063-04

王钢,赵莉君,李捷,等. 静止无功发生器在风电场电网中的应用研究[J]. 工矿自动化,2012(9):63-66.

静止无功发生器在风电场电网中的应用研究

王钢¹, 赵莉君¹, 李捷¹, 余亚冰²

(1. 山西省电力公司太原供电公司, 山西 太原 030012;

2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:分析并比较了晶闸管控制电抗器型无功补偿装置和静止无功发生器的动态响应时间和谐波特性,得出静止无功发生器动态响应速度更快、谐波含量更低的结论;对静止无功发生器在风电场电网正常运行和发生三相接地短路故障时的应用情况进行了仿真研究,结果表明,静止无功发生器可在风电场电网正常运行时降低输电线路损耗、抑制并网点电压的波动和闪变,在电网发生短路故障时增强风机低电压穿越能力;在某风电场通过断开静止无功发生器端子上330 kV母线PT空气开关来模拟电网三相接地短路故障,测试结果证明,静止无功发生器能够在较短的时间内达到最大容性无功输出,提高了电网运行的稳定性。

关键词:风力发电;风电场;静止无功发生器;低电压穿越;谐波特性

中图分类号:TD605 文献标识码:A 网络出版时间:2012-08-30 09:11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120830.0911.016.html>

Application Research of Static Var Generator in Wind Power System

WANG Gang¹, ZHAO Li-jun¹, LI Jie¹, YU Ya-bing²

(1. Taiyuan Power Supply Company of Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030012, China.

2. College of Electrical and Information Engineering of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The paper analyzed and compared dynamic response time and harmonic characteristics of thyristor controlled reactor type static var compensator and static var generator, and got a conclusion that static var generator has quicker dynamic response speed and lower harmonic content. It did simulation research of static var generator applied in wind power system at normally running time and three-phase grounding short-current fault time separately. The simulation results showed that static var generator can reduce transmission line loss and restrain voltage fluctuation and flicker of the coupling when wind power system runs normally and enhance low voltage ride through ability when short-current fault happens. It also simulated three-phase grounding short-current fault by cutting off 330 kV PT air switch of terminal board of static var generator in a wind power system, and got a result that the static var generator can achieve the maximum capacitive reactive output in a short time so as to improve stability of power grid.

Key words: wind power generation, wind power system, static var generator, low voltage ride through, harmonic characteristic

0 引言

随着风力发电技术的快速发展和国家在政策上

对可再生能源发电的重视,我国风力发电建设已进入一个快速发展时期^[1]。我国集中开发的大规模风电场大多远离负荷中心,当地电网结构薄弱,吸纳风

收稿日期:2012-05-25

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(1014RJZA013)

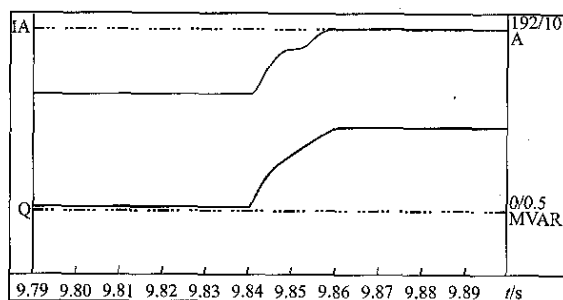
作者简介:王钢(1975-),男,河北滦县人,工程师,现主要从事电力市场及输配电自动化方面的研究工作。E-mail:565934583@qq.com

电的能力差,电力必须远距离传输。但是当大型风电场接入电力系统后,由于风速变化的随机性,会导致风力发电机输出功率随机波动较大、电压波动和闪变、系统调峰能力不足、故障情况下暂态不稳定等问题^[2]。大规模风电场并网引起的暂态电压稳定性问题一直是风电接入对电力系统影响研究中的热点。我国某风电基地就曾发生过因短路故障而造成大量风机脱网事故,导致电压大幅度波动,波及整个电网。因此,加强对风电场无功补偿装置(SVC)的研究和运行管理,充分发挥 SVC 的作用,对提高风电场电网的稳定性具有重要意义。

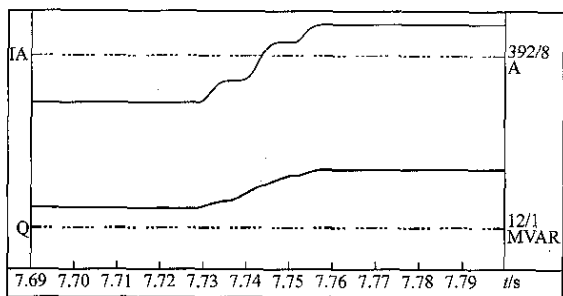
目前风电场常用的 SVC 有磁控电抗器(MCR)、静止无功发生器(SVG)、晶闸管控制电抗器(TCR)型 SVC。本文主要分析了 TCR 型 SVC 和 SVG 的工作原理,比较了两者在动态响应时间、谐波特性等方面的差异,并根据风电场的运行特点,研究了 SVG 在风电场中的作用。

1 TCR 型 SVC 与 SVG 的动态响应时间

SVC 的动态响应时间是指从控制或扰动信号输入开始到被控目标达到预期水平 90% 的时间^[3-4]。根据 GB/T 20297—2006《静止无功补偿装置(SVC)现场试验》规定,在甘肃某千万千瓦级风电基地分别对 SVG 和 TCR 型 SVC 的动态响应时间进行了现场测试,所得曲线如图 1 所示。



(a) SVG 动态响应曲线



(b) TCR 型 SVC 动态响应曲线

图 1 SVG 和 TCR 型 SVC 的动态响应时间测试曲线

从图 1 可看出,SVG 从 0 到最大无功输出的时

间约为 20 ms,而 TCR 型 SVC 需要将近 30 ms。由于电网故障往往为瞬时性故障,在系统发生故障时,SVG 可比 TCR 型 SVC 以更快的速度达到最大无功输出,为系统提供无功支撑,防止系统崩溃或解列。

2 TCR 型 SVC 与 SVG 的谐波特性分析

TCR 型 SVC 中的 TCR 部分通过晶闸管的开通来控制,只要控制角不为零,流过电抗器的电流就不是正弦波,使得大量谐波注入。SVG 的输出电压也不是正弦波,存在很大的奇次谐波。对于 SVG,可采用桥式变流电路的多重化技术、多电平技术或链式结构来消除较低次的谐波,并使高次谐波减小到可以接受的程度^[5]。根据 GB/T 14549 的规定,在风电场动态 SVC 自动运行的情况下,测试装置连接点母线的谐波电压水平,其中 3、5、7 次谐波含量见表 1。

表 1 SVG 和 TCR 型 SVC 的谐波含量

谐波次数	谐波含量/%	
	SVG	TCR 型 SVC
3	0.200 78	0.386 65
5	0.062 26	0.122 99
7	0.046 62	0.052 67

从表 1 可看出,在装置正常运行时,TCR 型 SVC 的 3、5、7 次谐波含量均比 SVG 高,对电网造成的谐波污染比 SVG 严重。

经比较发现,SVG 在动态响应时间和谐波特性方面的性能均优于 TCR 型 SVC。但受到技术和经济性的限制,SVG 的容量做得还不是很大。根据风电场电网在故障瞬间需要较大容性无功支撑的特点,SVG 可以和并联电容器组配合使用,在系统故障时动态调节并网风电场的无功功率,从而提高风电场电网暂态电压稳定性。因此,本文主要研究在风电场电网正常运行和发生故障时,SVG 在改善电网电能质量、提高系统运行稳定性等方面的作用。

3 SVG 在风电场电网正常运行时应用的仿真研究

为了验证 SVG 在风电场电网正常运行时的作用,在 Matlab/Psat 中搭建了电网系统正常运行时的仿真模型,如图 2 所示,并对 SVG 投入前后风电场各节点电压和各输电线路的有功、无功损耗变化情况进行了仿真研究。该仿真模型中,风电场由 8 台双馈型风力发电机组组成,单机容量为 2 MVar。风力发电机一箱式变压器组接线方式为一机一变单

元接线方式,将风机出口的 690 V 电压升高至 35 kV 后经汇流母线送至 330 kV 升压站,经过升压后送往电力系统。SVG 经降压变压器并联于升压站内 35 kV 母线侧。

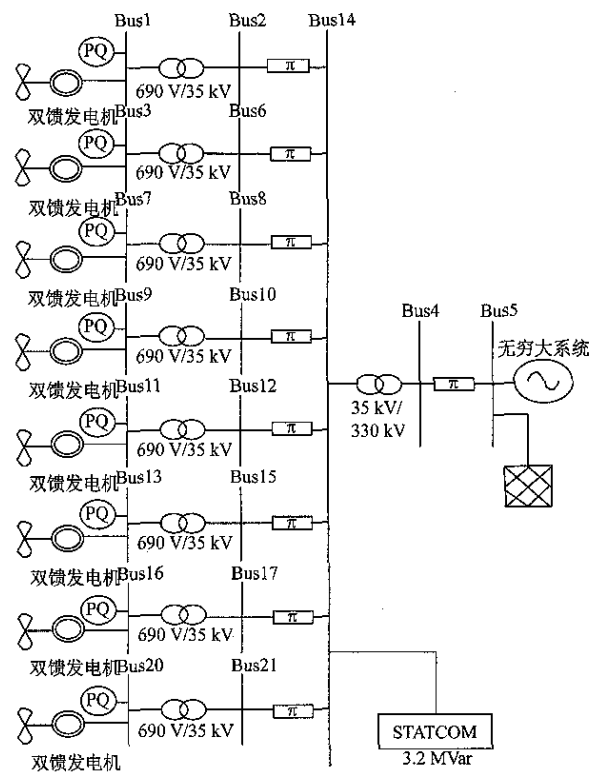


图 2 风电场电网正常运行时的仿真模型

对仿真模型进行潮流计算,所得结果见表 2~4。

表 2 SVG 投入前后风电场电网各节点电压变化情况

节点名称	Bus1	Bus2	Bus14
SVG 投入前电压有效值/kV	0.608 8	33.293 3	30.504 3
SVG 投入前电压相位/rad	0.774 2	0.676 36	0.409 69
SVG 投入后电压有效值/kV	0.704 76	38.683 6	35.000 0
SVG 投入后电压相位/rad	0.650 64	0.574 96	0.367 57

(注:Bus3、Bus7、Bus9、Bus11、Bus13、Bus16、Bus20 的节点电压同 Bus1;Bus6、Bus8、Bus10、Bus12、Bus15、Bus17、Bus21 的节点电压同 Bus2)

从表 2 可看出,SVG 投入运行前,由于风机、变压器、输电线路等设备均属于感性设备,在风电场电网正常工作时需要吸收一部分容性无功。由于风电场没有加装 SVC,使得风电场内各节点电压低于正常值。此时风电场若受到干扰或发生故障,很容易因无功不足而导致电压波动过大,可能引起大量风机脱网,影响整个系统的稳定性。SVG 投入运行后可以工作在恒电压模式下,从而使风电场电网各节点的电压运行在正常范围内;当电网发生扰动后,

SVG 可以根据需要对无功进行动态跟踪补偿,从而提高系统的电压稳定性。

表 3 SVG 投入前后各输电线路潮流及其损耗变化情况

线路名称	Bus1—Bus2			
	$P_{\text{flow}}/\text{MW}$	$Q_{\text{flow}}/\text{MVar}$	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$Q_{\text{loss}}/\text{MVar}$
SVG 投入前	1.883 8	0.384 4	0.009 5	0.189 92
SVG 投入后	1.96	0.4	0.007 67	0.153 43

线路名称	Bus2—Bus4			
	$P_{\text{flow}}/\text{MW}$	$Q_{\text{flow}}/\text{MVar}$	$P_{\text{loss}}/\text{MW}$	$Q_{\text{loss}}/\text{MVar}$
SVG 投入前	1.874 3	0.194 52	0.000 16	0.501 46
SVG 投入后	1.952 3	0.246 57	0.000 13	0.404 21

(注:Bus20—Bus21、Bus3—Bus6、Bus7—Bus8、Bus9—Bus10、Bus11—Bus12、Bus13—Bus15、Bus16—Bus17 的 P_{flow} 、 Q_{flow} 、 P_{loss} 、 Q_{loss} 与 Bus1—Bus2 相同。Bus6—Bus14、Bus8—Bus14、Bus10—Bus14、Bus12—Bus14、Bus15—Bus14、Bus17—Bus14、Bus21—Bus1 的 P_{flow} 、 Q_{flow} 、 P_{loss} 、 Q_{loss} 与 Bus2—Bus14 相同)

表 4 SVG 投入前后风电场和 35 kV 输电线路总的有功、无功损耗变化情况

总损耗	有功损耗/MW	无功损耗/MVar
SVG 投入前	0.077 28	5.531 04
SVG 投入后	0.062 4	4.461 12

从表 3 和表 4 可看出,SVG 投入运行之前,由于风机、变压器、输电线路等感性设备在正常运行时需要从电网吸收一部分无功,因此会造成无功功率的倒送,这样不仅减小了输电线路的输送容量,而且会增加输电线路的有功、无功损耗。在风电场并网加装 SVG 之后,风电场内所需的无功功率可以由 SVG 提供,从而避免了无功的倒送,提高了输电线路的输送容量,降低了输电线路的损耗。

4 SVG 在风电场电网发生故障时应用的仿真研究

本文对 330 kV 母线侧发生三相接地短路故障时,SVG 投入前后风电场电网电压的变化情况进行了仿真研究。首先在 Matlab/Simulink 中搭建了风电场电网发生三相接地短路故障时的仿真模型,如图 3 所示。仿真参数与图 2 一致。

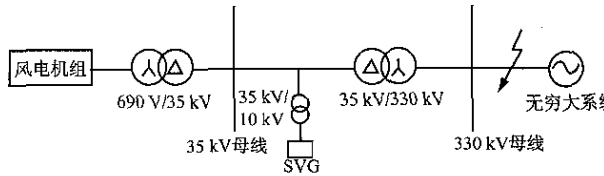
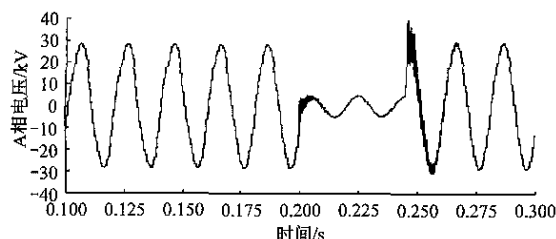


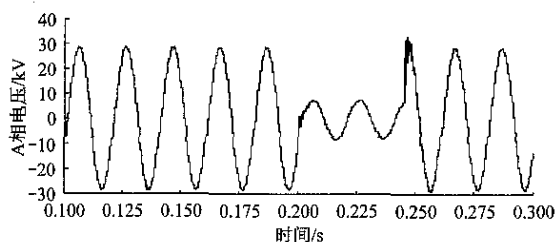
图 3 风电场电网发生三相接地短路故障时的仿真模型

图 4 为 SVG 投入前后升压站内 35 kV 母线侧相电压波形。可见在 SVG 投入运行前,电网发生三

相短路故障后,35 kV 母线侧相电压有较大幅度的下跌,其故障相电压的峰值跌落至 5 kV 左右,故障相电压低于正常运行电压的 20%。根据风电场并网技术规定,此时风机可以脱网。考虑到该地区风电在电网中所占比例较大,若风机在系统发生故障时仍采取被动保护式解列方式,则会增加整个系统的恢复难度,甚至可能使故障加剧,最终导致系统其它机组全部解列,严重时可能会使整个电网崩溃^[5]。SVG 投入运行后,故障相电压升高至 7 kV 左右,高于正常运行时相电压的 20%,此时风机应并网运行。



(a) SVG 投入前



(b) SVG 投入后

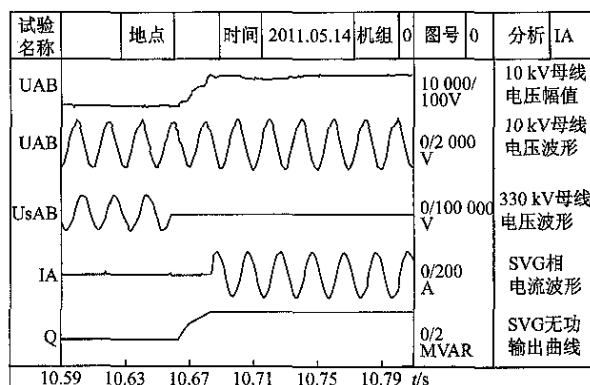
图4 SVG投入前后升压站内35 kV 母线侧相电压波形

5 SVG在风电场电网发生故障时应用的测试

为了测试 SVG 在风电场电网发生故障时对电压跌落的支撑作用,在某千万千瓦级风电基地某大型风电场进行了现场测试。通过断开 SVG 端子排上 330 kV 母线 PT 空气开关来模拟电网电压 100% 跌落故障,记录发生故障后 330 kV 母线电压的波形、SVG 连接降压变压器低压侧电压的波形和幅值、SVG 的无功电流和无功输出,如图 5 所示。

从图 5 可看出,在 $t=10.65$ s 时断开 SVG 端子排上 330 kV 母线 PT 空气开关,母线电压跌为 0。经过约 10 ms 延时后,SVG 检测到系统电压跌落,并在较短的时间内达到最大容性无功输出,为系统提供电压支撑。SVG 通过调整输出电流的幅值和

相位来控制 330 kV 母线侧电压。

图5 断开330 kV 母线PT空气开关后
电网系统电压及SVG无功输出波形

6 结语

经分析比较可知,SVG 比 TCR 型 SVC 具有更快的动态响应速度和更低的谐波含量;对风电场电网正常运行和发生故障时,SVG 对电网运行的影响进行了仿真及测试,结果表明,SVG 在电网正常运行时能够将并网点电压控制在正常范围内,减少输电线路的有功和无功损耗;在电网发生故障时能在较短的时间内达到最大无功输出,为系统提供一定的电压支撑,提高了风电场的故障穿越能力,可防止大量风机脱网,确保风电机组连续运行及电网安全稳定。

参考文献:

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(3):77-81.
- [2] 刘峻,何世恩.建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):19-23.
- [3] 魏巍,王渝红,李兴源,等.大型风电场建模及接入甘肃嘉酒电网仿真分析[J].电力系统自动化,2009,33(18):96-101.
- [3] 王兆安,杨军,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [4] 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.
- [5] 范高峰,迟永宁,赵海翔.用STATCOM提高风电场暂态电压稳定性[J].电工技术学报,2007,22(11):158-162.