静止无功补偿器控制方式的应用探索

简要分析了当前SVG恒装置无功、恒无功、恒功率因数和恒电压4种控制方式的逻辑原理。通过哈密某风电汇集站在风机脱网后的现场运行情况得出了以下结论：在控制目标存在2个，只取其中1个作为补偿点时，恒电压控制方式是最适合的运行方式。结论对实际工程具有重要的指导意义。

王利超　于永军　焦春雷　孙　帆　翟保豫/国网新疆电科院

王利超/助理工程师

关键词/Keywords
SVG·
控制方式·
恒电压·

0　引言

随着风力发电在电力系统中所占比例的增加，其影响越来越大[1-4]。然而，风力资源存在很大的随机性和波动性，风电机组出力也随之不确定[5]。此外，风电机组不具备良好的无功调节能力[6]，导致大量的静止无功补偿装置（SVG）被广泛应用于风电场的无功调节。

目前，SVG控制方式有恒装置无功、恒无功、恒功率因数和恒电压[7]4种模式。4种控制模式皆采用经典控制理论，控制目标限制为1个[8-9]。在实际生产中，如果在三绕组变压器低压侧装设SVG，将高压侧作为补偿点，对其无功功率、功率因数和电压控制时，还需对中压侧的无功功率进行限制，否则可能会有大量无功功率流向中压侧。

本文将结合SVG的4种控制模式逻辑策略原理，以及哈密某220 kV风电场在风机脱网发生前后，其汇集站三绕组变压器低压侧SVG现场运行实际情况，分析得出适合于三绕组变压器低压侧装设SVG对高压侧（补偿点）的控制模式。

1　SVG控制模式策略

恒装置无功模式通常用于设备的调试、检修和功能测试，恒无功、恒功率因数控制和恒电压控制模式则是用于对补偿点的无功功率、功率因数和电压控制调节。

1.1　恒装置无功控制模式

恒装置无功控制模式逻辑如图1所示。图1中，Q_{ref}为恒装置无功控制模式的控制定值。将补偿点的无功功率控制定值与瞬时值比较，然后通过PI控制器调节，得到SVG输出无功的参考定值。

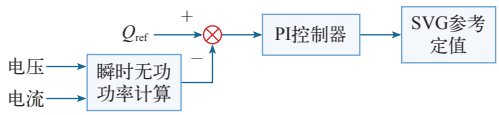


图1　恒装置无功控制逻辑图

1.2　恒无功控制模式

恒无功控制模式逻辑图如图2所示。图2中，Q_{net}为SVG通过采样实时计算得到的主变压器高低压侧无功功率；Q_c为与SVG一起配合的FC支路无功输出。将补偿点的无功功率控制定值Q_{ref}与瞬时值Q_{net}比较，通过PI控制器调节后，还需考虑FC支路无功功率的影响，然后转化为SVG电流，得到SVG输出无功的参考定值。

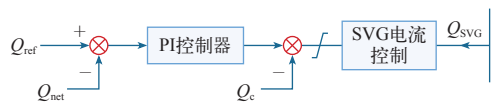


图2　恒无功控制模式

1.3　恒功率因数控制模式

图3为恒功率因数控制模式。图3中，$\cos_{ref}$为恒功率因数模式控制定值；Q_{ref}为通过功率因数控制定值、负荷有功功率和无功功率三者实时计算产生的

SVG无功参考值；Q_c为FC支路的无功功率输出。其控制策略与恒无功模式相比，除补偿点Q_{ref}来源不同，其他基本相同。

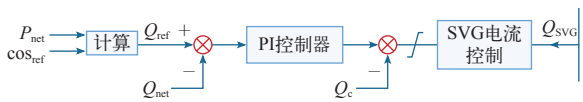


图3　恒功率因数控制模式

1.4　恒电压控制模式

图4为恒电压控制模式。图4中，U_{ref}为恒电压模式控制定值；U_{mean}为补偿点控制侧平均电压。该模式中增加了SVG电流反馈环节，引入了U/I斜率特性[10]。

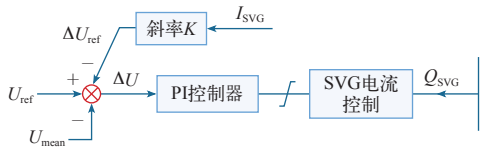


图4　恒电压控制模式

图5为SVG恒电压控制模式U/I特性曲线图。图5中，①、②和③为系统曲线，④为SVG曲线。系统曲线与SVG曲线交点为SVG实际工作点，纵坐标与SVG曲线交点为电压控制定值U_{ref}。当系统曲线、SVG曲线斜率不变的情况下，补偿点电压U_1大于控制定值U_{ref}时，SVG发出感性无功，使得电压降低至U_1'（等于U_{ref}）；反之，U_2小于控制定值U_{ref}时，SVG发出容性无功功率，使得电压升高至U_2'（等于U_{ref}）。改变电压偏差ΔU，对应感性电流ΔI_L（或容性电流ΔI_C），即需要的无功功率是某一可控的定值。

在恒电压控制模式下，如果将高压侧作为补偿点，由于变压器本身电压比固定不变，变压器

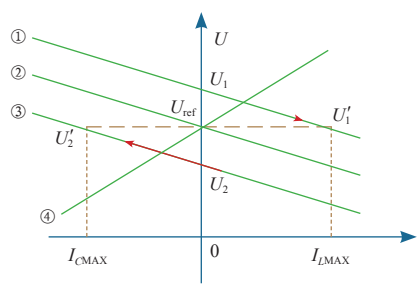


图5　恒电压控制模式U/I特性曲线

中压侧电压将是与SVG高压侧补偿点控制定值所对应的某一定值。此外，受SVG恒电压控制模式斜率特性的影响，不会发生大量无功功率流向中压侧。因而，SVG对高压侧电压控制调节的同时，间接地控制了中压侧电压。在其余几种控制策略中，装设在低压侧的SVG，若将高压侧作为补偿点，却无法对中压侧的无功功率、功率因数给予限制。

2　现场调试结果分析

以哈密某风电汇集站在风机脱网事故后的现场调试为例进行说明。风电汇集站主接线图如图6所示。站内安装有3台容量为240 MV·A的三绕组变压器主变压器（220 kV/110 kV/35 kV）。220 kV侧采用双母线接线方式，由母联断路器连接，双母线带有1条出线为烟景南线；110 kV侧也采用双母线接线方式，由母联断路器连接，汇聚了由风电场引来的6条进线；35 kV侧为3段单母线，每段母线配置2套±45 Mvar的SVG，共6套。

风机脱网发生前，SVG处于恒装置无功控制模式，补偿点为高压侧220 kV侧。当现场风速急剧增加，风电场总出力从266 MW上涨至近466 MW，大负荷情况下该模式不能满足要求，出现三相电压不平衡。当三相电压不平衡达到SVG闭锁值，1#SVG$_1$、1#SVG$_2$相继闭锁。SVG在30 ms内，无功功率输出降至0 Mvar。期间，大面积的风机多次激发低压穿越功能，产生大量谐波，导致2#SVG$_1$、2#SVG$_2$、3#SVG$_1$和3#SVG$_2$相继出现谐波闭锁，抑制无功输出。最终，风机低压穿越功能激发失败，所有机组脱网运行。

根据相关部门要求，将SVG控制模式先后转为恒功率因数、恒电压控制模式。恒功率因数控制模式下，控制定值设置为0.98。通过集控中心后台监视，可得到三台主变压器高低压侧无功功率分布情况如下表所示。很容易发现：在转换后，1#SVG$_1$、1#SVG$_2$处于满发状态，1#主变压器35 kV侧发出容性无功−94.44 Mvar（SVG存在有余量），且后台监视高压侧功率因数为0.75，未达设定值要求。2#SVG$_1$、2#SVG$_2$也处于满发状态，

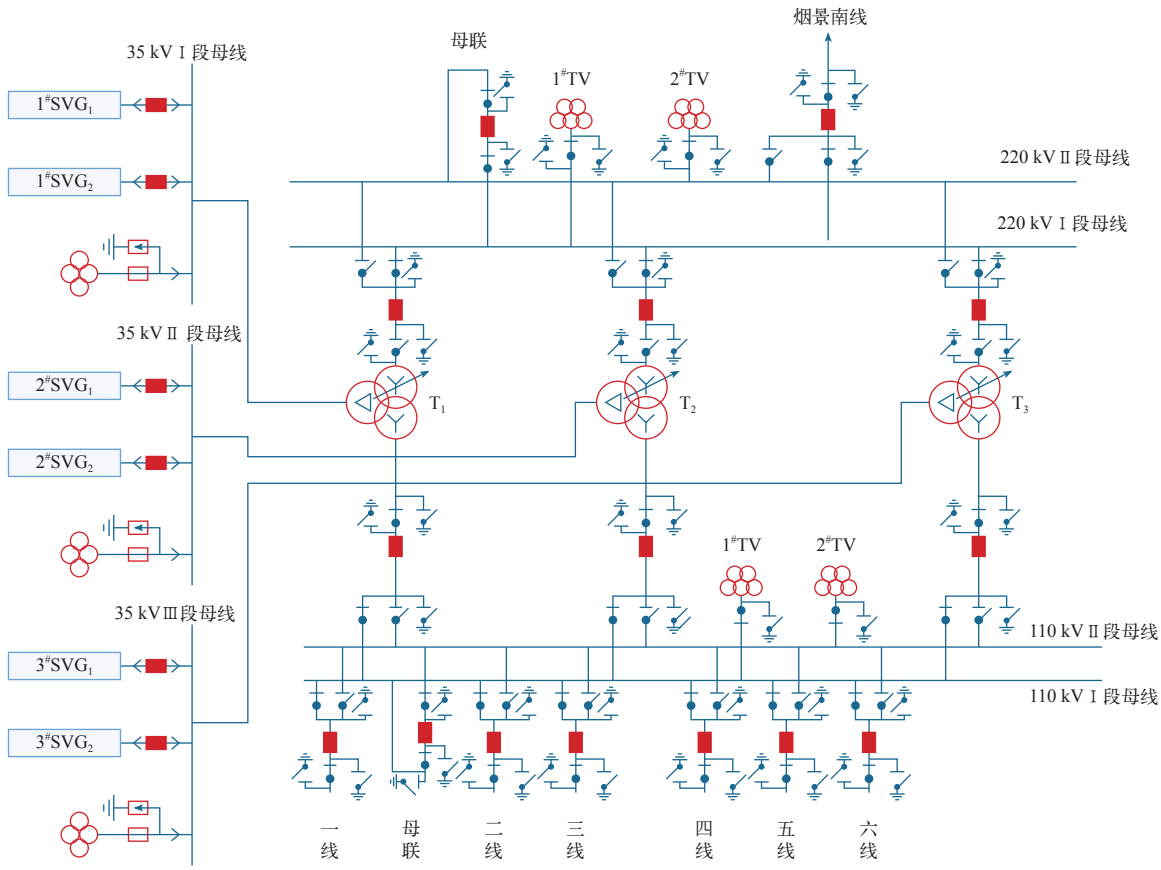


图6 风电场汇集站主接线图

表 两种控制模式下，3台主变压器高中低侧无功功率分布表

控制模式	变压器T_1			变压器T_2			变压器T_3		
	220 kV侧	110 kV侧	35 kV侧	220 kV侧	110 kV侧	35 kV侧	220 kV侧	110 kV侧	35 kV侧
恒功率因数	−3.93	97.83	−94.44	8.77	−100.45	91.68	2.21	1.37	−3.58
恒电压/Mvar	2.28	4.93	−7.21	3.37	−13.43	10.06	2.34	1.30	−3.64

2#主变压器35 kV侧发出感性无功91.68 Mvar，高压侧功率因数为0.52。此外，1#主变压器、2#主变压器中压侧具有大量的无功分流。显然，当在主变压器为三绕组变压器的线路中，该模式将高压侧作为补偿点控制时，无法对中压侧无功加以控制，为非正常运行方式。

将SVG控制模式转为恒电压控制模式时，控制定值设置为235 kV。转换后所有SVG不再处于满发状态。1#主变压器35 kV侧发出容性无功−7.21 Mvar，且后台监视高压侧功率因数为0.92。2#主变压器35 kV侧发出感性无功10.06 Mvar，高压侧功率因数为0.85。3#主变压器35 kV侧发出容性无功3.64 Mvar，高压侧功率因数为0.92。在主变压器为三圈变压器的线路中，该模式在对高压侧作为补偿点控制时，无大量无功功率流向中压侧，可以正常运行。

3 结束语

本文结合SVG恒装置无功、恒无功、恒功率因数和恒电压4种控制策略，以及哈密某风电场风机脱网事故发生后，汇集站SVG现场运行情况的分析，得出以下结论：①恒装置无功模式仅用于设备的调试、检修和功能测试，大负荷工况下，无法满足无功需求；②恒无功、恒功率因数模式

无法对中压侧无功加以控制，无法正常运行；③恒电压运行方式，由于变压器电压比固定不变，和SVG恒电压控制模式的斜率特性，间接地控制了中压侧，闭环恒电压控制模式可以正常运行。

参考文献

[1] 王天施，苑舜．风力发电对电网的影响及对策 [J]．高压电器，2010，46 (8)：89-92．

[2] Chompooin Wai C，Lee W J，Fuangfoo P，et al．System impact study for the interconnection of wind generation and utility system [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2005，41 (1)：163-168．

[3] 许晓艳，马烁，黄越辉，等．大规模风电接入对电网静态电压稳定性影响机理研究 [J]．中国电力，2015，48 (3)：139-143．

[4] 杨新力，林勇．风电接入对电网电压的作用机理 [J]．南方电网技术，2012，6 (4)：37-39．

[5] 唐一铭，袁越，张新松，等．基于最大投资回报率的风光联合并网情况下输电网规划 [J]．水电能源科学，2013，31 (10)：221-224．

[6] 唐一铭，顾文，范立新，等．风电场SVG测试方法研究与结果分析 [J]．高压电器，2015，51 (6)：15-19．

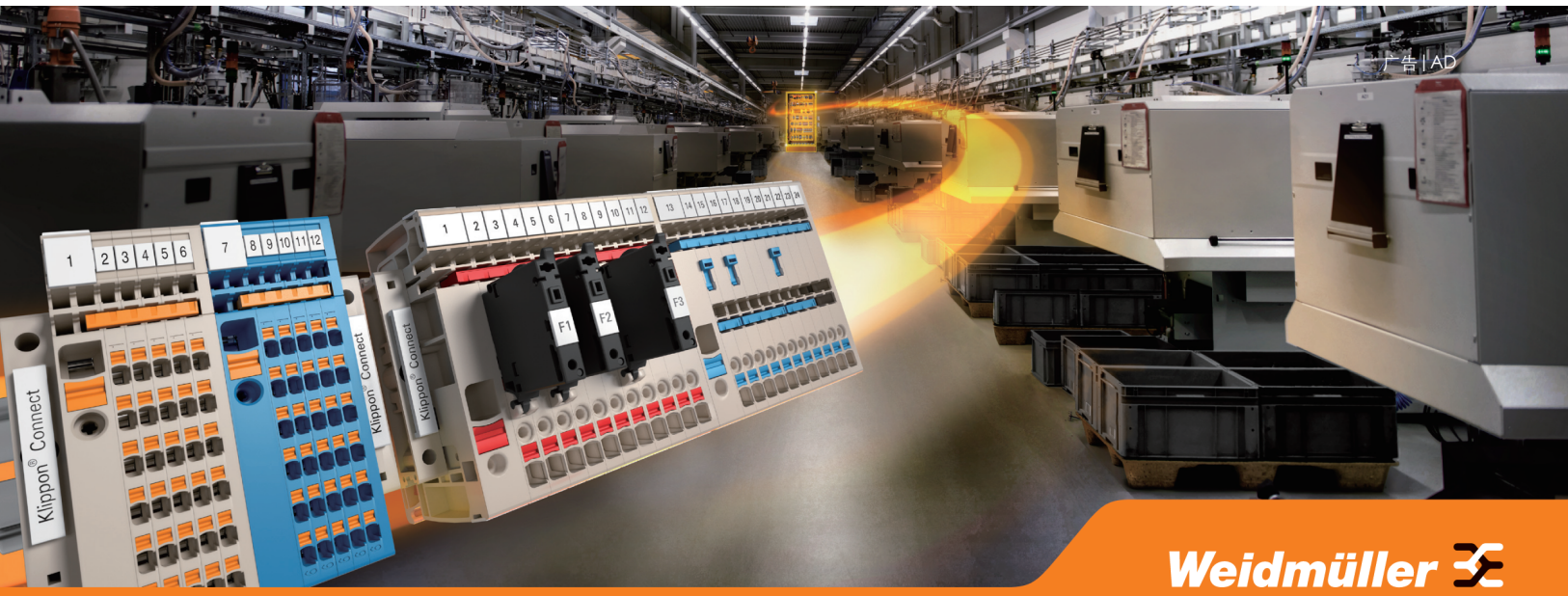
[7] 李云飞．动态无功补偿装置 (SVG) 在变电站中的应用 [J]．数字技术与应用，2011 (9)：75-76，78．

[8] 王传波，刘旸．现代控制理论与经典控制理论的对比研究 [J]．机械管理开发，2006 (3)：6-8．

[9] 王国军，陈松乔．自动控制理论发展综述 [J]．微型机与应用，2000 (6)：4-7．

[10] 王建赜，胡晓光，纪延超，等．静止无功发生器并联运行控制方法研究 [J]．哈尔滨工业大学学报，2003 (4)：462-465，468．

（收稿日期：2017－08－13）EA



机柜设备的可靠电压供应

魏德米勒Klippon® Connect控制电压分配端子AAP

随着机柜中负载数量的增加，电压供应及过流保护就变得越复杂。为了简化您的机柜装配，魏德米勒实现了将这两个功能整合在一个独特的、模块化的系统中：Klippon® Connect控制电压分配端子AAP。等电位分配端子的设计助您在构建机柜控制电压分配时，节约达40%的空间及20%的时间 — 还可以选用是否带保险丝，以进行过流保护。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008　官网: www.weidmueller.com.cn

扫一扫，即刻了解
Klippon® Connect

Let's connect.