风电场动态无功补偿设备引发低频振荡实例分析及建议

周　专[1]，常喜强[2]，吕　盼[1]，张　锋[2]，刘建亮[3]
(1. 国网新疆电力公司经济技术研究院，新疆 乌鲁木齐　830016;
2. 国网新疆电力调度控制中心，新疆 乌鲁木齐　830006;
3. 国网新疆电力公司奎屯供电公司，新疆 奎屯　832100)

摘　要: 随着国家对新能源开发与利用的大力支持，各风电基地风电装机容量不断增加。但是风电基地均处于电网末端，末端电网与主网联系较弱，短路电流水平较低，抗扰动能力低。目前风电场升压站引入动态无功补偿设备，可以有效缓解电网电压波动，提高末端电网稳定性。但是动态无功补偿设备配置及参数设置不合理可能进一步恶化系统稳定性，甚至引发系统低频振荡问题。因此分析动态无功设备动态调节特性及各参数对系统稳定性影响，以新疆某地区风电场动态无功补偿设备电厂引发低频振荡为例，重现了风电场动态无功补偿设备参数设置不合理引发低频振荡现象。分析结果表明动态无功补偿设备参数对电力系统动态稳定具有重要影响，动态无功补偿设备电压控制方式及相关参数设置不合理可能诱发电力系统低频振荡。对风电场动态无功补偿设备提出了相关建议和措施，有效指导了相关参数设置，对风电场动态无功补偿设备运行与管理具有重要的指导意义。

关键词: 风电场; 动态无功补偿; 电压调整; 低频振荡

Abstract: As the development and utilization of new energy are supported by our country, the wind power bases and wind capacity keep growing. But wind power bases are in the end of power grid, the connection between the terminal grid and the main grid is weak, the level of short - circuit current and the ability to resist the disturbance are low. At present, the dynamic reactive compensation equipment is introduced into wind booster station, which can effectively alleviate the fluctuation of grid voltage and improve the stability of terminal grid. But the unreasonable configuration and parameters of dynamic reactive compensation equipment may deteriorate the system stability, and even cause low - frequency oscillation. So taking the low - frequency oscillation caused by the power plant with dynamic reactive power equipment of wind farm in one area of Xinjiang for example, the low - frequency oscillation caused by the unreasonable parameter setting of dynamic reactive power equipment of wind farm is reconstructed. The analysis results show that the parameter setting of dynamic reactive compensation equipment has vital influence on the dynamic stability of power system, and the unreasonable voltage control mode and related parameter setting may lead to low - frequency oscillation of power system. The relevant suggestions and measures are proposed for the dynamic reactive compensation equipment of wind farm, which gives an effective guidance for the relevant parameter setting, the operation and management of dynamics reactive compensation equipment.

Key words: wind farm; dynamic reactive compensation; voltage regulation; low - frequency oscillation
中图分类号: TM614　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1003 - 6954(2015)05 - 0001 - 05
DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.001

0　引　言

近几年，随着国家对风电开发的大力支持以及风电并网技术的不断成熟，中国风电装机容量正呈现爆发式增长，截止到2014年年底全国风电总装机容量为114 609 MW，风电装机容量跃居世界第一。大量的风电接入电网给现有的网架以及电气装置带来了巨大的挑战[1-2]。

由于风资源丰富地区位于偏远地区，远离负荷中心，导致风电接入点及送出电网网架结构薄弱，系统短路容量较低，抗扰动能力弱。风电出力特性区别于常规机组，风电出力依赖于自然条件，具有随机性、间歇性和不可控性。风电出力的随机波动相当于给系统提供了扰动，可能导致系统电压及送出线路功率波动，进而影响系统安全稳定运行。同时风电机组不能提供无功功率，需要从电网系统吸收无

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

功功率，为了保证系统无功功率就地平衡，目前在风电场升压站装设动态无功补偿设备以提供无功支撑。动态无功设备可以根据系统侧电压变化，发出连续可调的无功功率以维持电压在合格范围内，可以有效缓解电网电压波动。根据相关文献研究，动态无功补偿设备的引入可以有效提高系统稳定性[3-5]。

但是动态无功补偿设备配置及参数设置不合理可能进一步恶化系统稳定性，甚至引发系统低频振荡问题。因此分析了动态无功设备动态调节特性及各参数对系统稳定性影响，以新疆某地区风电场动态无功补偿设备电厂引发低频振荡为例，重现了风电场动态无功补偿设备参数设置不合理引发低频振荡现象。分析结果表明动态无功补偿设备参数对电力系统动态稳定具有重要影响，动态无功补偿设备电压控制方式及相关参数设置不合理可能诱发电力系统低频振荡。对风电场动态无功补偿设备提出了相关建议和措施，有效指导了相关参数设置，对风电场动态无功补偿设备运行与管理具有重要的指导意义。

1 低频振荡概述

电力系统中发电机经输电线并列运行时，在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆，并在缺乏阻尼时引起持续振荡，此时，输电线上功率也会发生相应振荡。由于振荡频率很低，一般为0.2～2.5 Hz，故称为低频振荡。而随着联网规模的不断增大，低频振荡频率也随之降低至0.1 Hz甚至更低。

根据系统振荡频率的不同范围，将低频振荡分为本地振荡模式和区间振荡模式两种类型：1）区域内振荡模式：涉及一个发电厂内的发电机组与电力系统其他部分之间的摇摆，其振荡频率一般为1～2 Hz；2）区域间振荡模式：系统中某一个区域内的多台发电机与另一区域内的多台发电机之间的相对摇摆。当系统表现为两群发电机之间振荡时，振荡频率大致在0.1～0.3 Hz之间，当系统表现为多群发电机之间的振荡时，振荡频率大致在0.4～0.7 Hz之间[6-8]。

引起电网低频振荡的原因主要分为两种情况，一种是由于电网自身阻尼较弱，在电网发生微小扰动后，电网不能维持稳定运行，出现较长时间持续波动不能平息的同步振荡，这种引起振荡的现象称之为系统动态稳定问题。具体判据为：系统阻尼比小于3%。另一种是当电网受到周期性功率振荡扰动源的影响，由于振荡扰动源的振荡频率接近电网自身振荡的固有频率，造成电网随着振荡扰动源一起大范围振荡，这种振荡称之为强迫功率振荡，该类型的振荡一般是由于网内电源的率先振荡引起。

随着区域电网之间互联，电网规模不断增大，电力系统中元件组成越来越多，以及动态元件、FACTS元件等元件应用，容易引发系统低频振荡。许多动态元件运行时需要根据自身特性及电网运行特性设置其参数，若参数设置不合理可能引发系统低频振荡问题。因此在对于动态元件需要重点关注相应参数设置，并对其并网特性进行测试。

2 动态无功补偿器原理与模型

目前风电场装设的动态无功补偿设备主要是SVC和SVG两种，两种动态无功补偿设备基本上相同，但原理上仍存在不同，数学模型也存在一定的区别[9-11]。

2.1 SVC

静止无功补偿系统（static var compensator，SVC）是目前电力系统应用最多、最为成熟的并联补偿设备，也是一类较早得到应用的FACTS控制器。根据所用的并联电容器组和并联电抗器组控制方式的不同分为不同的类型，电容器组的电容器可以由晶闸管控制分组投入或切除，并联电抗器可以通过晶闸管进行平滑控制改变其电抗值。

系统侧电压发生变化后，通过SVC信号发生器发出控制投入电容器组数和晶闸管触发角，动态调整SVC输出的无功功率，SVC输出的无功功率为

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_L = \left(\omega C - \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\pi \omega L}\right) U^2 \qquad (1)$$

式中，β为晶闸管的导通角，$\beta = \pi - \alpha$，α为触发角。

从式（1）可以看出，通过改变触发角β可以连续平滑调节SVC向系统注入的无功功率，从而控制SVC所连接母线的电压甚至是需要远方控制的母线电压。

依据SVC控制原理建立控制框图，如图1所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

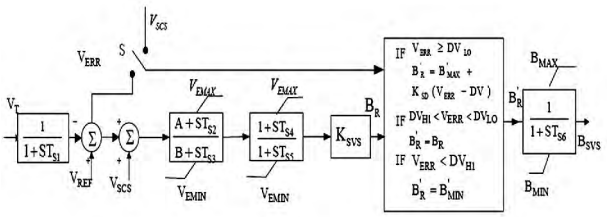

图1　SVC控制结构图

当系统电压变化、偏离设定参考值时，SVC的信号发生器将发出型号调整晶闸管的导通角，从而改变SVC无功出力，保证系统动态无功平衡，维持SVC控制母线电压在设定值范围内，如图2所示系统发生短路后SVC动态特性曲线。

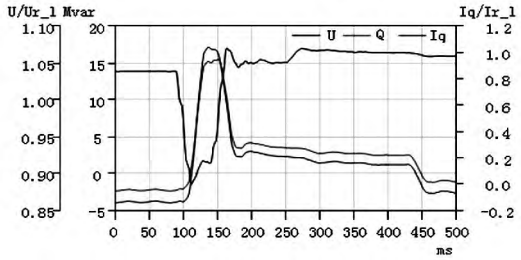

图2　SVC动态特性曲线

从图2可以看出，在系统侧电压降低时，SVC立即响应，提高自身无功出力，阻止系统电压降低，以维持系统电压在合理范围内。

2.2　SVG

静止同步补偿器(static var generator，SVG)是基于电压源变频器的装置，直流侧为储能电容，为其提供直流电压支持，IGBT逆变器通常由多个逆变器串联或并联而成，交流电压的大小、频率和相位可以通过控制IGBT的驱动脉冲进行控制。图3为SVG原理示意图。

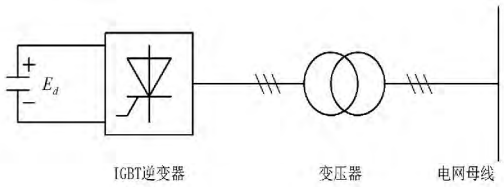

图3　SVG原理示意图

整个SVG装置相当于一个电压大小可以控制的电压源，如果电压源提供的电压幅值大于交流系统接入点的交流电压，SVG吸收的无功功率 $Q<0$，此时SVG相当于电感；如果电压源提供的电压幅值小于交流系统接入点的交流电压，SVG吸收的无功功率 $Q>0$；此时的SVG相当于电容。电流大小由电压差与两点之间的阻抗比值决定，SVG装置产生的电压幅值可以快速的控制，因此其吸收的无功功率可以连续的由正到负快速控制。

依据SVG控制原理建立控制框图，如图4所示。

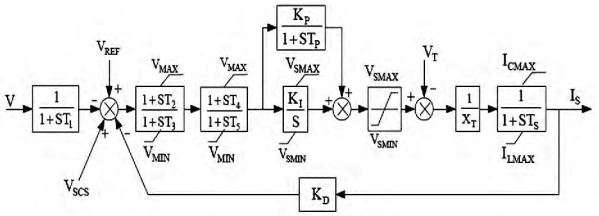

图4　SVG控制结构图

当SVG接入风电场中压侧汇流母线时，根据SVG容量的大小可以部分甚至完全提供风电场的无功需求；在电网侧发生大扰动故障时，SVG能够动态调整其输出无功功率，维持控制母线电压在设定值范围内。系统发生短路后SVG动态特性曲线如图5所示。

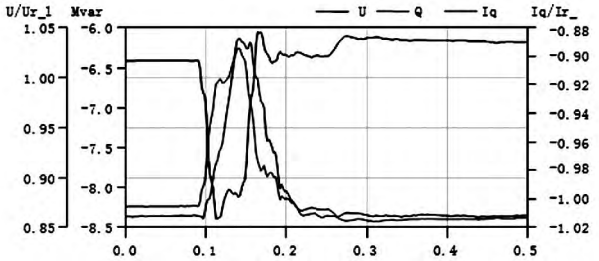

图5　SVG动态特性曲线

从图5可以看出，电压跌落持续时间约为60 ms，跌落期间SVG最大无功输出为 −6.3 Mvar，电压恢复后SVG无功迅速恢复至跌落前水平，电压开始跌落瞬间至SVG开始响应约20 ms，电压开始跌落瞬间至无功电流最高点约为48 ms。因此当系统电压降低时，风电场升压站的SVG立即响应，动态调节其无功出力，阻止系统电压降低，以维持系统电压在合理范围内。

3　风电场动态无功补偿设备引发低频振荡案例分析

新疆哈密三塘湖地区共有两座220 kV变电站，分别为麻黄沟东变电站(180+240 MVA)、天电麻黄沟西变电站(180 MVA)。两座220kV变电站为风电场汇集站，接入两座220 kV变电站的风电装机容量为990 MW，而220 kV汇集站仅通过1回220 kV线路(220 kV山黄线107 km)与主网相连，与系统联系较弱，短路容量较低(天电麻黄沟短路容量为2 079.8 MVA，麻黄沟东短路容量为2 466.6 MVA)。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

新疆哈密三塘湖地区网架结构如图6所示。

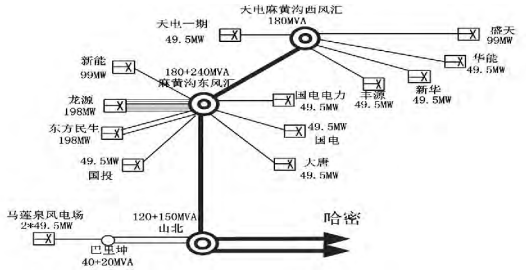

图6　新疆哈密三塘湖地区网架结构

由于新疆哈密三塘湖地区网架结构薄弱，抗扰动水平低，经常出现低频振荡。以某次实际低频振荡为例进行分析，通过调取PMU数据，振荡期间山黄线输送有功功率为76～88 MW，无功功率为－6～1 Mvar，麻黄沟东变电站220 kV母线电压为232～235 V，系统频率为49.85～50.25 Hz；振荡过程中有功振荡幅度为10～15 MW，无功振荡幅度为6～9 Mvar，母线电压振荡幅度为7～13 kV，系统频率振荡幅度为0.2～0.35 Hz，系统振荡频率为1.26 Hz。220 kV山黄线PMU曲线如图7所示。

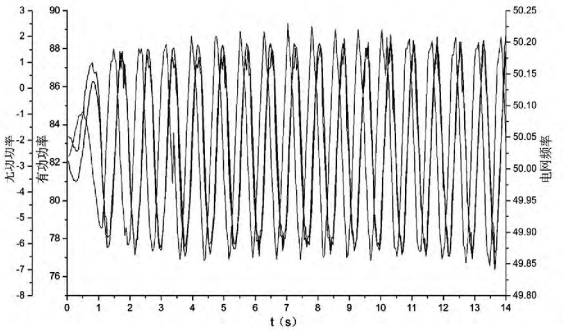

图7　220 kV山黄线PMU曲线

通过对PMU数据及低频振荡扰动源定位方法[12-14]，初步确定扰动源为220 kV天电麻黄沟西变电站下的风电场。为了进一步确定扰动源位置，对哈密三塘湖地区风电场进行了低频振荡试验。

试验过程描述如下：

第1步，投入丰源电厂SVG。

第2步，投入华能电厂SVG。

第3步，投入麻黄沟西220 kV变电站SVC。

第4步，退出盛天电厂SVC，系统发生振荡。

第5步，投入盛天电厂SVC，系统振荡先消失。经过一段时间后，出现两次振荡短时振荡过程。

第6步，退出丰源SVG，系统出现暂态振荡过程。

第7步，投入丰源SVG，系统发生振荡。

通过对试验结果进行分析，确定天电麻黄沟西地区风电场配置的动态无功补偿设备是引发系统低频振荡的根源。

根据动态无功补偿设备原理分析，其主要控制参数为连续控制增益（Ksvc）、间断控制增益（Ksd）、电压偏差（DV）、超前滞后环节（Ts2、Ts3）。各主要参数的改变可能导致动态无功补偿设备无功输出特性发生改变，影响系统运行特性。同时由于动态无功补偿设备作为风电场无功支撑的元件，高密集度接入电网，各动态无功补偿设备相互之间动态调节可能出现运行问题。

通过对哈密三塘湖地区风电场进行仿真分析，分析结果表明：1）动态无功补偿设备中控制增益对引起系统振荡的影响比较大，增益越大对系统影响越大，同时导致多个动态无功补偿之间控制配合困难，当增益超过80时，在小扰动情况下就有可能引发低频振荡。2）超前滞后环节对引起系统振荡的影响也比较大，Ts2越大、Ts3越小，容易影响系统高频振荡。3）动态无功补偿设备中两种控制模式（连续控制、间断控制）同时存在时，可能引起系统振荡。

4　动态无功补偿相关建议

针对上述分析，由于风电场的高密集度接入电网，各风电场的动态无功补偿设备之间相互耦合特性，改变了系统运行特性，影响了系统正常稳定运行。通过分析提出几点关于风电场动态无功补偿设备的建议：

1）动态无功补偿设备控制目标均为该风电场主变压器高压侧电压。

2）同一风场内有多套动态无功补偿设备存在相同的控制目标时，动态无功补偿设备必须具备设置调差系数（电压斜率）的功能，一般设置范围为0～10%，且运行人员可在后台修改。

3）动态无功补偿设备控制器的PI参数，在满足响应性能的前提下，需确保系统在最小方式下运行时控制器输出不产生振荡，且PI控制参数能够支持在线修改。

4）动态无功补偿设备需具备无功控制方式，启

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

动前设置为无功控制方式，控制风场无功为0，等启动完成后，改为电压控制方式正常运行。同样退出前设置为无功控制方式，控制风场无功为0。

5) 风场增加AVC子站，AVC子站对上同调度通讯，接受电压指令；对下与风机、无功补偿等站内设备通讯，稳态时动态无功补偿设备采用定无功方式控制，AVC根据系统情况自动分配无功补偿的指令、主变压器档位指令等，优化风场电压无功配置。暂态发生电压跌落或骤升时动态无功补偿设备采用暂态强补功能，快速释放无功，等电压恢复到正常范围后继续接受AVC无功指令转正常控制。

6) 对现有风电场SVG/SVC进行改造，增加或完善次同步振荡抑制功能；对后续并网风电场，要求必须配备具有次同步振荡抑制功能的SVG。

5 结 论

通过对动态无功设备动态调节特性及各参数对系统稳定性影响分析，得出动态无功补偿设备参数对电力系统动态稳定具有重要影响，动态无功补偿设备电压控制方式及相关参数设置不合理可能诱发电力系统低频振荡。动态无功补偿设备中控制增益对引起系统振荡的影响比较大，增益越大对系统影响越大，同时导致多个动态无功补偿设备之间控制配合困难；超前滞后环节对引起系统振荡的影响也比较大，Ts2越大、Ts3越小，容易影响系统高频振荡；动态无功补偿设备中两种控制模式(连续控制、间断控制)同时存在时，可能引起系统振荡。针对风电场动态无功补偿设备引发低频振荡问题，以新疆某地区风电场动态无功补偿设备电厂引发低频振荡为例，提出了关于风电场动态无功补偿设备的相关建议，有效指导了相关参数设置，对风电场动态无功补偿设备运行与管理具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 周专，姚秀萍，常喜强，等. 多风区接入对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 中国电力，2014，47(6)：106－110.

[2] 迟永宁，王伟胜，刘燕华，等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化，2006，30(15)：10－14.

[3] 冉然. 并网风电场无功补偿策略研究[D]. 保定：华北电力大学，2011.

[4] 范雪峰，张中丹，杨昌海，等. 大型风电基地动态无功补偿对风电外送动态稳定性的提升作用研究[J]. 电网与清洁能源，2013，29(10)：66－73.

[5] 杨勇，秦睿，拜润卿，等. 动态无功补偿装置在酒泉地区风电场的优化应用[J]. 电网与清洁能源，2012，28(4)：81－85.

[6] 王铁强，贺仁睦，王卫国，等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报，2002，22(2)：21－25.

[7] 刘辉，杨寅平，田云峰，等. 电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化，2012，36(10)：113－117.

[8] 郑海涛，郑昕，吴兴全，等. 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(16)：149－154.

[9] 胡国文，於锋，王威. STATCOM与固定电容组合的高压异步电动机动态无功补偿节能技术[J]. 电力自动化设备，2011，31(3)：75－78.

[10] 王祯楠. 风电基地动态无功补偿与低电压穿越的相互影响及协调控制[D]. 保定：华北电力大学，2014.

[11] 吴林林，李海青，王皓靖，等. 动态无功补偿装置抑制风电汇集地区高电压问题的可行性研究[J]. 华北电力技术，2014(10)：61－66.

[12] 徐衍会，贺仁睦，韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报，2007，27(17)：83－87.

[13] 杨东俊，丁坚勇，李继生，等. 基于参数辨识的强迫功率振荡扰动源定位方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(2)：26－29.

[14] 陈磊，陈亦平，闵勇，等. 基于振荡能量的低频振荡分析与扰动源定位：(二)扰动源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化，2012，36(4)：1－5.

作者简介：

周 专(1987)，硕士，研究方向为电网规划、电力系统分析与控制；

常喜强(1976)，硕士，研究方向为电力系统运行与控制；

吕 盼(1983)，硕士，研究方向为电力系统规划与分析。

(收稿日期：2015－06－24)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net