基于Power Factory的风电场并网功率振荡阻尼控制设计

风电场并网将影响系统阻尼特性，提高发生低频振荡的可能性，带来周边电网的稳定性问题。通过对双馈异步电机控制分析，设计一种结合风机有功与可控串联补偿装置（TCSC）控制相结合的功率振荡阻尼控制，通过测量低频振荡后系统功率与频率波动，产生控制信号，结合双馈异步电机（DFIG）有功控制与TCSC补偿电容，以实现系统低频振荡的抑制。搭建更精确的DIgSILENT/Power Factory与Matlab/Simulink互联测试系统。结果表明，所提设计能有效抑制区域间与区域内两种振荡模态，提高系统暂态稳定性。

肖　静　高立克　杨艺云　吴丽芳　肖园园／广西电网有限责任公司电力科学研究院

肖　静／工程师

关键词／Keywords
双馈异步电机·
功率振荡阻尼控制·
低频振荡·
暂态稳定·

0　引言

世界范围内多种规模风电场在各电压等级的并网运行正逐步实现。我国近年来建设和规划的风电场，如六座规划容量50 MW以下风电场接入西昌电网项目[1]、广西2014年开工建设的全州县等地11座规划容量为50 MW左右的内陆风电场[2]等项目，以及《国家应对气候变化规划（2014～2020年）》、《国家能源局关于做好2014年风电并网消纳工作的通知》等文件，逐步呈现风电场建设从超大规模、远距离传输向就近消纳、接近负荷中心转移的特点。研究表明，风电场并网运行会影响系统阻尼特性，一定程度上会带来周边电网的稳定性问题[3-4]，提高发生低频振荡的可能性[5-6]，对用户电能质量及电网安全稳定运行的影响将更加明显。因此，进一步研究含风电场的电力系统发生低频振荡的特性及其抑制方法具有重要意义。

为消除低频振荡威胁，一方面是充分利用现有的电力系统稳定器（PSS），另一方面利用FACTS装置，如可控串联补偿装置（TCSC）阻尼控制器等，能获得较好的附加阻尼效果，改善系统稳定性[7]。文献[8]分析了双馈风电机组并网前后阻尼特性的变化及对系统低频振荡模式的影响，未涉及低频振荡抑制方法的研究；文献[9]仅分析了TCSC接入对提高含风电系统暂态稳定的积极作用，对TCSC的控制机理与设计未作讨论；文献[10]模拟了一种阻尼控制策略，但未分析风电场功率，即控制的策略设计依据。

本文研究设计了双馈异步电机（DFIG）有功控制与TCSC晶闸管导通角控制相结合的POD阻尼控制器，以测量得到的低频振荡后电网的功率与频率波动为基础，解耦出控制信号，用以协调DFIG有功控制与TCSC电容补偿，改善振荡模态阻尼，对系统低频振荡的抑制效果更加迅速和显著。

随着近年来风力发电重要性的提高，PSCAD、PSASP和BPA[11]等电力系统仿真软件也对风机模型不断进行专门研究与改进。其中，德国DIgSILENT公司的Power Factory软件因其强大元件库及扩展功能、精确的仿真能力和友好的图形界面，以欧洲为起点，在相关行业应用广泛。将其与Matlab强大的控制函数与工具结合，能更好地还原文中提出的POD阻尼控制，使结果分析更加准确。

本文实现一套结合了DIgSILENT/Power Factory与Matlab/Simulink的交互

测试系统，使风电场接入电网的风机模型与控制效果更加准确，并实现文中提出的POD阻尼控制仿真。结果表明，本文所述的POD阻尼控制器能够有效抑制区域间振荡与区域内振荡两种振荡模态，提高系统暂态稳定性。

1 含风机的配电网低频振荡特性分析

1.1 变速恒频双馈风力发电系统建模

DFIG由双馈感应发电机、变速齿轮箱和转子侧双向变换器组成，感应发电机定子侧直接与电网相连，转子侧通过双向变换器连接电网。转子转速随风速变化时，通过双向变换器提供对应频率的磁场，以保持定子侧频率恒定，实现DFIG的变速恒频发电。

DFIG在$d-q$坐标系下的定子侧电压与磁通方程可表示为

$$\begin{cases} u_{ds}=R_s i_{ds}-\omega_s \Psi_{qs}+\dfrac{\mathrm{d}\Psi_{ds}}{\mathrm{d}t} \\ u_{qs}=R_s i_{qs}+\omega_s \Psi_{ds}+\dfrac{\mathrm{d}\Psi_{qs}}{\mathrm{d}t} \\ \Psi_{ds}=L_s i_{ds}+L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs}=L_s i_{qs}+L_m i_{qr} \end{cases} \tag{1}$$

式中，R_s为定子等效电阻；ω_s为同步转速；i_{ds}、i_{qs}、i_{dr}和i_{qr}分别为$d-q$坐标系下定子与转子电流；Ψ_{ds}、Ψ_{qs}为$d-q$坐标系下定子磁通；L_m为定子与转子互感；L_s为定子漏感与互感之和。

理想情况（不计损耗）下，定子功率方程表示为

$$\begin{cases} P_s=\dfrac{3}{2}(u_{ds}i_{ds}+u_{qs}i_{qs}) \\ Q_s=\dfrac{3}{2}(u_{qs}i_{ds}-u_{ds}i_{qs}) \end{cases} \tag{2}$$

DFIG转子侧变流器采用电压矢量定向控制技术，将d轴固定在电网（定子侧）电压矢量上，从而有$\Psi_{ds}=\Psi_s$，$\Psi_{qs}=0$，$\mathrm{d}\Psi_{qs}/\mathrm{d}t=0$，由定子电压与磁通方程可以得到

$$i_{qs}=-\frac{L_m}{L_s}i_{qr} \tag{3}$$

由式（1）、式（3）可得

$$i_{ds}=\frac{L_m}{L_s}\left(\frac{u_{qs}-R_s i_{qs}}{\omega_s L_m}-i_{dr}\right) \tag{4}$$

将式（3）、式（4）带入式（2）中可得

$$\begin{cases} P_s=-\dfrac{3\omega_s L_m^2 i_{ms} i_{qr}}{2L_s} \\ Q_s=\dfrac{3\omega_s L_m^2 i_{ms}(i_{ms}-i_{dr})}{2L_s} \end{cases} \tag{5}$$

其中，$i_{ms}=\dfrac{u_{qs}-R_s i_{qs}}{\omega_s L_m}$。

由式（5）可以看出，通过电压矢量定向控制技术，将转子电流i_r转换到$d-q$坐标系下的电流i_{dr}、i_{qr}，可以实现DFIG有功、无功功率的解耦控制。

DFIG在$d-q$坐标系下的转子侧电压与磁通方程可表示为

$$\begin{cases} u_{dr}=R_r i_{dr}-(\omega_s-\omega_r)\Psi_{qr}+\dfrac{\mathrm{d}\Psi_{dr}}{\mathrm{d}t} \\ u_{qr}=R_r i_{qr}+(\omega_s-\omega_r)\Psi_{dr}+\dfrac{\mathrm{d}\Psi_{qr}}{\mathrm{d}t} \\ \Psi_{dr}=L_r i_{dr}+L_m i_{ds} \\ \Psi_{qr}=L_r i_{qr}+L_m i_{qs} \end{cases} \tag{6}$$

式中，R_r为转子等效电阻；ω_r为转子转速；Ψ_{dr}、Ψ_{qr}为$d-q$坐标系下转子磁通；L_r为转子漏感与互感之和。

结合式（3）、式（4）和式（6）可得到转子电压在$d-q$坐标系下的解耦方程，即

$$\begin{cases} u_{dr}=R_r i_{dr}+\sigma L_r\dfrac{\mathrm{d}i_{dr}}{\mathrm{d}t}-(\omega_s-\omega_r)\sigma L_r i_{qr} \\ u_{qr}=R_r i_{qr}+\sigma L_r\dfrac{\mathrm{d}i_{qr}}{\mathrm{d}t}+(\omega_s-\omega_r)\left(\sigma L_r i_{qr}+\dfrac{L_m^2}{L_s}i_{ms}\right) \end{cases} \tag{7}$$

其中，$\sigma=1-\dfrac{L_m^2}{L_s L_r}$。

由式（7）可以看出，在使用电压矢量定向控制技术后，转子侧电压与电流存在交叉耦合，并没有完全解耦，需要在转子侧增加补偿电压Δu_{dr}、Δu_{qr}以消除交叉耦合的影响，其中Δu_{dr}、Δu_{qr}可表示为

$$\begin{cases} \Delta u_{dr}=(\omega_s-\omega_r)\sigma L_r i_{qr} \\ \Delta u_{qr}=-(\omega_s-\omega_r)\left(\sigma L_r i_{qr}+\dfrac{L_m^2}{L_s}i_{ms}\right) \end{cases} \tag{8}$$

1.2 低频振荡分析

电力系统低频振荡按振荡涉及范围与振荡频率可分为局部振荡与区域间振荡。当系统在小扰动的作用下，发电机转子会产生0.1～2.5 Hz的持续振荡。由于系统阻尼的作用，振荡会逐渐减弱；若系统阻尼不足，振荡则越来越强烈，直到系统失稳。分析低频振荡的方法一般包括特征值法与时域分析法。

当风电场接入互联电力系统后，以两互联区域系统为例，发电机功率增量可表示为

$$\begin{cases}\Delta P_1=\dfrac{E_1V_{\mathrm{W}}}{X_{1\mathrm{W}}}\cos(\delta_1-\delta_{\mathrm{W}})(\Delta\delta_1-\Delta\delta_{\mathrm{W}})\\ \Delta P_2=-\dfrac{E_2V_{\mathrm{W}}}{X_{2\mathrm{W}}}\cos(\delta_{\mathrm{W}}-\delta_2)(\Delta\delta_{\mathrm{W}}-\Delta\delta_2)\end{cases}\tag{9}$$

式中，E_1、E_2为两区域发电机母线电压；V_{W}为风电场接入点电压；$X_{1\mathrm{W}}$、$X_{2\mathrm{W}}$为发电机到接入点电抗；δ_1、δ_2和δ_{W}为发电机与风电场母线电压相位；$\Delta\delta_1$、$\Delta\delta_2$和$\Delta\delta_{\mathrm{W}}$为风电场接入后母线电压相位差。

不考虑系统线路损耗，两互联区域动态有功与风电场动态有功可表示为

$$\Delta P_1+\Delta P_{\mathrm{W}}=\Delta P_2\tag{10}$$

式中，ΔP_1、ΔP_2和ΔP_{W}分别为两区域发电机与风电场有功功率变化量。

结合式（9）、式（10）可以看出，风电场的动态特性与风电场接入系统的距离与容量有关。接入容量越大ΔP_{W}越大，$\cos(\delta_{1(2)}-\delta_{\mathrm{W}})$越小；接入位置越远$1/X_{1\mathrm{W}}$、$1/X_{2\mathrm{W}}$越小，$\Delta\delta_{\mathrm{W}}$越大。这些因素影响风电场接入互联系统产生的阻尼作用。

2 TCSC的POD控制原理与设计

2.1 TCSC与DFIG控制原理

晶闸管控制串联电容器补偿（TCSC）是抑制电网互联系统低频振荡、提供有效阻尼的重要手段之一。TCSC通过改变晶闸管的触发角可以连续、大范围地调节线路阻抗，具备快速调节补偿线路电抗的能力，减小风电并网母线与发电机母线之间的电压幅值差和相角差，提高互联系统联络线输送功率，改善系统稳定性[12]。

在机电振荡过程中，功角变化的影响一般远大于电压变化的影响，故可以忽略风电场并网母线电压的变化[13]，通过远程测量风电场并网母线频率与电压相位差，控制串联电容补偿器晶闸管导通角度，TCSC补偿电抗可以用下式表示，即

$$X_{\mathrm{TCSC}}=X_{\mathrm{C}}-\frac{X_{\mathrm{C}}^2}{X_{\mathrm{C}}-X_{\mathrm{L}}}\frac{2\beta+\sin 2\beta}{\pi}+\frac{4X_{\mathrm{C}}^2}{X_{\mathrm{C}}-X_{\mathrm{L}}}\frac{\cos^2\beta}{k^2-1}\frac{k\tan k\beta-\tan\beta}{\pi}\tag{11}$$

式中，$\beta=\pi-\alpha$为相位补偿环节补偿角；α为晶闸管导通角；$k=\sqrt{X_{\mathrm{C}}/X_{\mathrm{L}}}$。

电网在小扰动下，有功功率增量与系统频率增量可由下式表示，即

$$2H\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}=\Delta P_{\mathrm{G}}+\Delta P_{\mathrm{W}}+\Delta P_{\mathrm{T}}-\Delta P_{\mathrm{L}}-D\Delta f\tag{12}$$

式中，H为系统时间惯性常数；ΔP_{G}、ΔP_{W}、ΔP_{T}和ΔP_{L}分别为在小扰动下发电机、风电场、联络线和负荷的有功功率变化；$\Delta f=f_{\mathrm{e}}-f_{\mathrm{ref}}$为电网频率变化量；$D$为系统阻尼系数。

TCSC对互联系统区域间低频振荡有很好的阻尼作用，若低频振荡发生在区域内，可以通过产生相对系统振荡功率相位相反的风电场有功调制信号ΔP_{MOD}，控制DFIG转子电流i_{qr}，通过风电场有功功率输出抑制系统功率振荡。风电场有功调制信号ΔP_{MOD}可表示为

$$\Delta P_{\mathrm{MOD}}=\Delta P_{\mathrm{W}}-2H\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}\tag{13}$$

其中，$\Delta P_{\mathrm{MOD}}=-K_{\mathrm{s}}(\Delta P_{\mathrm{G}}+\Delta P_{\mathrm{T}}-\Delta P_{\mathrm{L}}-D\Delta f)$。

在系统稳定运行状态下，风电场通过MPPT运行在最大有功输出状态。若系统发生低频振荡（$\Delta f\neq 0$），在增益控制K_{s}的作用下，产生有功调制信号ΔP_{MOD}，通过解耦出转子电流i_{qr}实现控制风电场有功输出，抑制系统功率振荡。

2.2 POD控制策略

针对接入风电场容量与位置固定的互联系统，在联络线上安装TCSC的POD阻尼控制装置，本文设计一种TCSC控制模型，如图1所示。

在系统发生低频振荡时，通过远程测量环

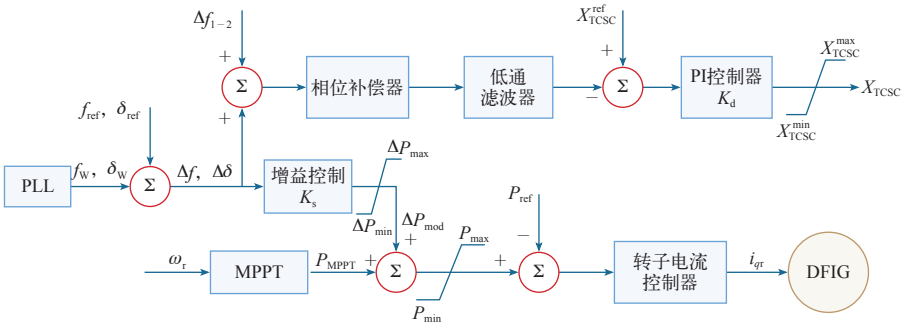

图1 POD阻尼控制器模型

节，测量互联系统两区域频率差$\Delta f_{1\text{-}2}$与风电场并网频率f_W，产生控制信号控制晶闸管导通角α与转子电流i_{qr}，通过改变TCSC串补电容与风电场有功出力，提高系统在小扰动下的暂态稳定性。

3 控制实现与算例分析

3.1 Power Factory/Matlab交互实现

仿真工具是实现大规模电力系统及其组件的建模与设计的经济最优方案。模型参数的准确性也将直接影响系统的仿真结果[14]。随着电力系统复杂程度的提高，单一的仿真工具有时无法独立满足仿真需求。多种仿真工具的交互使用能充分发挥各自优势，提高仿真过程的执行力。

DIgSILENT/Power Factory具有丰富的元件库，可实现自定义的编程语言、多样的数据兼容性，被国外学界与工业界广泛接受。低频振荡分析[15]常用的时域仿真以event与DSL、DPL编程语言实现，通过复杂程度不等的扰动全面分析低频振荡现象；特征值分析以采用QR和Arnoldi/Lanczos算法实现，直观地用频率、阻尼比等多种指标对特征值进行筛选和分群。

Power Factory的slot接口能为模型控制器和其他复杂传递函数提供Matlab环境，在每个时间步长内，插入Power Factory暂态仿真框架的都将收到输入值、并在执行*.m文件程序或Simulink后传递输出，实现更为复杂的仿真与控制。如图2所示。

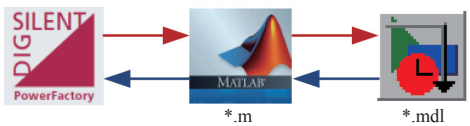

图2 Power Factory与Matlab的数据与控制交互

通过上述交互，可以将Power Factory的优点与Matlab强大的控制系统工具箱结合，灵活实现文中提出的控制方法，分析结果更为准确。

3.2 算例分析

使用Power Factory软件建立四机两区域系统作为测试算例，其中G_1为参考发电机，各发电机额定容量为200 MV·A，系统额定电压为110 kV，网络参数见参考文献[16]，系统结构如图3所示。在3号节点处接入不同数量的DFIG模拟不同容量的风电场出力。TCSC安装在联络线上，系统稳定运行时，TCSC用于补偿线路电抗；当发生小干扰扰动时，阻尼控制器作用，TCSC用于抑制联络线上的功率振荡。该算例中的TCSC功率阻尼控制器模型在Matlab/Simulink中建立，通过使用接口函数集成在Power Factory软件中做测试。

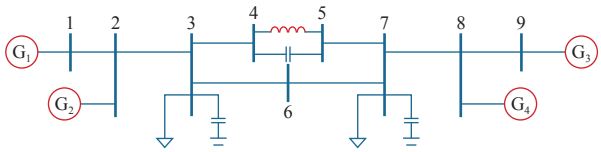

图3 四机两区域系统结构图

2#母线接入容量为100 MV·A的风电场，运行在80%额定功率下，风电场出力占系统总功率的10%。该算例中的POD阻尼控制器，TCSC控制增益K_d=22 000，风电场功率调制信号控制增益K_s=1 000，PLL安装在有风电场接入的2#母线处，$\Delta f_{1\text{-}2}$通过远程测量发电机G_2、G_4接入母线处的频率差得到，3#、7#母线处装有SVC，用于补偿远距离输电产生的电压降。该测试系统主要振荡模态如下表所示。

表　系统主要振荡模态

模式	特征值	阻尼比	频率/Hz	阻尼时间常数/s	参与因子
1	−0.583 4±j5.803 7	0.100 2	0.923 7	1.714 1	G_1，G_2，G_3，G_4
2	−0.584 4±j4.839 9	0.119 8	0.770 3	1.711 2	G_1，G_3，G_4
3	−1.140 4±j0.825 1	0.810 2	0.131 3	0.876 9	风电场，G_2，G_3，G_4
4	−0.793 4±j0.540 9	0.826 2	0.086 1	1.260 5	风电场，G_2，G_3，G_4

由表中可以看出，风电场接入后该测试系统存在区域间与区域内两种低频振荡模态。当$t=5$ s时，联络线上6#母线发生三相短路故障；当$t=7$ s时，短路故障消除。附加POD阻尼控制器效果如图4～图7所示。

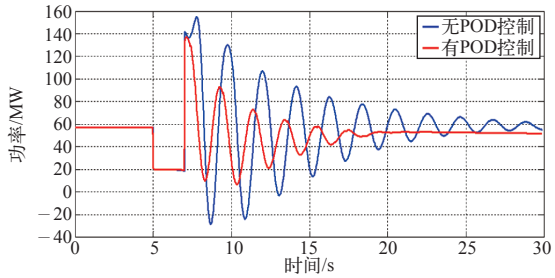

图4　联络线功率振荡曲线

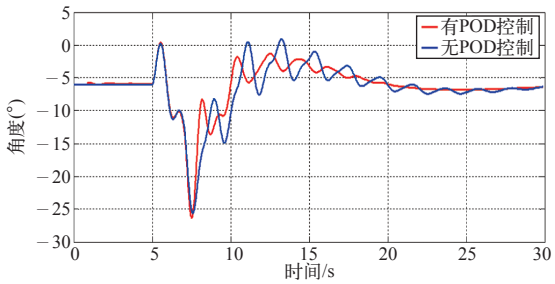

图5　发电机G_2转子相对角

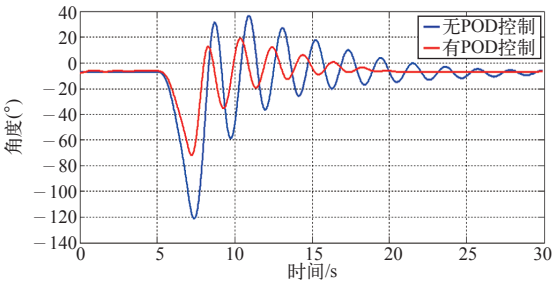

图6　发电机G_3转子相对角

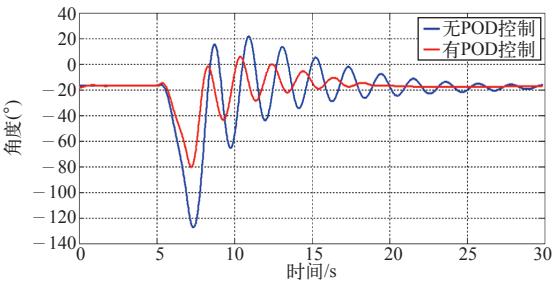

图7　发电机G_4转子相对角

可以看出，在区域间振荡与区域内振荡两种振荡模态中，附加POD阻尼控制器可以有效地抑制系统小干扰扰动造成的联络线功率波动，对区域内与区域间的发电机轴系振荡也有很好的抑制效果。

4　结束语

研究设计了一种DFIG有功控制与TCSC晶闸管导通角控制相结合的POD阻尼控制器。控制器通过测量电网发生低频振荡后互联系统功率波动与频率波动，产生功率调制信号ΔP_{MOD}与$\Delta f_{1\text{-}2}$解耦出用以控制DFIG有功出力的转子电流i_{qr}与晶闸管导通角控制信号。通过DFIG有功控制与TCSC补偿电容相结合，以达到抑制系统低频振荡的效果。

本文结合了DIgSILENT/Power Factory与Matlab/Simulink两种仿真工具的优点，搭建风机模型与控制效果更加准确的风电场接入电网的测试系统，并实现文中提出的POD阻尼控制仿真。结果表明，所述的POD阻尼控制器能够有效抑制区域间振荡与区域内振荡两种振荡模态，提高系统暂态稳定性。

参考文献

[1] 余秦军，刘月贤，黄忠培，等．风电接入西昌电网的安全稳定评估 [J]．电气应用，2014，33 (5)：26-29．

[2] 辛清影．广西风电建设在机遇中应对挑战 [N]．中国电力报，2014-04-09 (6)．

[3] 邹志翔，周克亮，袁晓冬．风电场接入对周边地区电网电压稳定性的影响分析 [J]．电网技术，2011，35 (11)：50-56．

[4] 彭卉，李胜芳，李亚军，等．分散式风电接入对地区配电网电压波动影响研究 [J]．电气应用，

2014，33 (13)：18-22.

[5] Gautam D，Vittal V，Harbour T．Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2009，24 (3)：1426-1434.

[6] 李辉，陈宏文，杨超，等．含双馈风电场的电力系统低频振荡模态分析 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (28)：17-24.

[7] 石辉，张勇军，徐涛．我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (24)：242-247.

[8] 和萍，文福拴，薛禹胜，等．风电场并网对互联系统小干扰稳定及低频振荡特性的影响 [J]．电力系统自动化，2014，38 (22)：1-10.

[9] 罗远翔，杨仁刚，刘铖，等．TCSC提高大容量风电接入系统的稳定性及控制策略 [J]．电测与仪表，2014，51 (4)：35-39.

[10] 李辉，陈宏文，杨超，等．含传输线功率信号的双馈风电场附加阻尼控制策略 [J]．电力系统自动化，2012，36 (24)：28-33.

[11] 边晓燕，杨立宁，黄鑫鑫，等．基于BPA的大规模风电场接入电力系统稳定性分析 [J]．电气应用，2014，33 (23)：164-169.

[12] 张祥宇，付媛，王毅，等．含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合PSS控制器 [J]．电工技术学报，2015，30 (1)：159-169.

[13] 林宇锋，徐政，黄莹．TCSC功率振荡阻尼控制器的设计 [J]．电网技术，2005，29 (22)：35-39.

[14] 刘涛，戴汉扬，宋新立，等．适用于电力系统全过程动态仿真的风电机组典型模型 [J]．电网技术，2015，39 (3)：609-614.

[15] 陈允平，孙婉胜，张海梁，等．低频振荡分析和控制方法的研究 [J]．高电压技术，2007，33 (4)：91-95.

[16] Kunder P．Power system stability and control [M]．New York：McGraw-HillInc，1994.

（收稿日期：2016－02－16）EA

(上接第87页)

[9] 陈春，汪沨，刘蓓，等．基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构 [J]．电力系统自动化，2014，38 (6)：55-60.

[10] 谢夏慧，汪沨，陈奇朋，等．含分布式电源的配电网关键负荷保障方法 [J]．电网技术，2013，37 (5)：1447-1453.

[11] 谢夏慧，汪沨，卢鸣凯，等．大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案 [J]．电网技术，2013，37 (7)：1834-1840.

[12] 刘蓓，汪沨，陈春，等．一种配电网故障阶段式恢复方法 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (3)：24-30.

[13] Yuan Qihong，Yuan Qincheng，Li Chunguang，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part I：research on the protection of the multiple power and radicalized connection structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-9.

[14] Li Chunguang，Yuan Qincheng，Yuan Qihong，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part II：research on the protection of the multiple power and loop connection structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-9.

[15] Huang Xiaoyun，Yuan Qincheng，Yuan Qihong，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part III：research on the protection of the breaker and load switch network structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-6.

（收稿日期：2016－03－10）EA