

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.024

基于 PMSG-PSS 的高风电渗透率电网低频振荡分析

彭章刚¹, 周步祥¹, 冯超²

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 国网达州供电公司, 四川 达州 635000)

摘要: 随着风能资源的不断开发与利用, 电力系统中风电比例也逐渐增大, 现阶段绝大部分风电机组尤其是 PMSG 不具备在系统频率振荡时向系统注入阻尼功率的能力, 因此大规模 PMSG 风电场的接入将削弱系统相对惯性和阻尼特性。针对该问题, 提出通过控制电力电子器件建立风机与系统的耦合关系, 使 PMSG 虚拟出与同步发电机类似的惯性响应, 同时附加 PSS 控制器使 PMSG 能够在电网故障振荡时提供功率支持, 从而提高区域电网稳定性。最后, 在四机两区域系统中进行了时域仿真, 验证了该方法具有改善高风电渗透率区域电网的系统惯性, 提高系统阻尼比, 增强电力系统抑制低频振荡的能力。

关键词: PMSG; 区域电网; 阻尼特性; 低频振荡; PSS

Analysis of Low Frequency Oscillation for Power System with Large Wind Power Integration Based on PMSG-PSS

PENG Zhanggang¹, ZHOU Buxiang¹, FENG Chao²

(1. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Grid Dazhou Electric Power Supply Company, Sichuan Dazhou 635000, China)

Abstract: With the continuous development and utilization of wind energy resources, the proportion of wind power in power system increases rapidly. At present, most of wind turbines especially the PMSG have no ability to provide power support when power system oscillates. Therefore, the integration of large scale PMSG will weaken the relative inertia and damping characteristics of the system. To solve this problem, controlling the electronic devices to set up the coupling relationship between PMSG and the system and adding PSS control to enable PMSG to damp the power system oscillations were presented to improve the stability of regional power grid. Finally, a time-domain simulation in four-machine two-area IEEE power system was conducted to indicate the proposed method. Simulation results show that this method is helpful for improving the system inertia and damping ratio of the power system with large wind power integration, and strengthen the ability to damp the power system oscillations.

Key words: PMSG; regional power system; damping characteristics; low frequency oscillation; PSS

0 引言

在能源危机日益加剧, 温室效应、城市雾霾等环境问题不断恶化的形势下, 大力发展清洁能源替代传统能源已成为缓解以上问题的主要途径。风力发电作为近年来增速最快的新能源利用形式, 其装机容量在电力系统中的占比不断提高^[1-3]。风电渗透率增大后, 电网以及风电场本身在安全运行方面将面

临故障穿越、调峰调频、系统动态稳定等问题^[4-7]。随着低压穿越控制方案的完善, 双馈感应异步发电机和多极直驱永磁同步发电机等风电机组的故障穿越问题已得到了逐步解决^[8]。对于风电机组参与系统有功和无功调节, 近年来国内外学者的研究中提出了降载运行^[9]和虚拟惯性控制^[10]等技术。

风电渗透率的提高, 将会削弱电力系统的相对惯性^[11], 理论上有助于缩短功率低频振荡时间, 改善系统阻尼特性。但是, 目前国内的风电机组在电网发

收稿日期: 2016-02-28; 修回日期: 2016-03-06

生功率振荡时不能分担振荡功率,从而加大了振荡区域内常规发电机的功率振荡压力,所以实际上是削弱了系统的阻尼特性^[12],反而会降低系统稳定性。相对于传统电网,高风电渗透率电网对阻尼要求更高,因此希望在风电机组中配置 PSS 使其具备分担电网有功功率振荡的能力^[13]。此外,系统惯量是阻止电网频率突变,辅助电网重建功率平衡的重要参数,且虚拟惯性控制同阻尼控制具有较强相关性。所以,通过有效协调惯性控制和阻尼控制,才能根本性地提升风电参与调节的能力及系统稳定性。

文[14]提出了 DFIG 的虚拟惯性控制策略,建立起了风力机转速和电网频率的耦合关系,但并没有分析惯性增加所产生的负阻尼效应;文[15]在 DFIG 机组中配置 PSS 控制环节使高渗透率电网的系统阻尼得到一定提升;文[16]通过设计 PMSG 阻尼控制器,使 PMSG 具有了对系统功率振荡的阻尼能力,没有计及系统惯性变化。

在前人工作基础之上,提出一种综合系统惯性和阻尼控制的 PMSG 机组 PSS 控制方案。通过在高风电渗透率电网仿真模型中搭建该控制模块,模拟分析该方案的有效性。结果显示该 PSS 能够有效抑制电网的低频振荡,验证了该方法的正确性和有效性。

1 PMSG 虚拟惯性及阻尼控制原理

1.1 虚拟惯性控制

电力系统惯量的主要作用是抑制电网频率突变,为电网重建功率平衡提供时间裕度。PMSG 风电机组与 DFIG 机组一样,通过电力电子变流控制器与电网联系,因而使风电机组的风力机转速丧失了与电网频率的直接耦合关系,因此也不具备常规同步发电机组所具有的系统惯性,PMSG 并网等值电路见图 1。

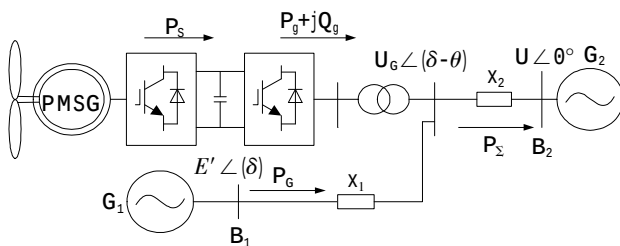


图 1 PMSG 接入电网等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of power system with PMSG

但 PMSG 风电机组具有较宽的转速调节范围,较 DFIG 机组具备更加灵活、可控的功率调节能力。因此,若能使 PMSG 转速与电网相关联,并在系统频率振荡时按需要调节其旋转动能,便可虚拟出机组惯性响应。由于风力机较同步电机具有更佳的转速调

节范围,因此 PMSG 还可虚拟出比自身惯量更大的虚拟惯量。

在不计系统阻尼情况下,同步发电机所储存的旋转动能 E_k 可表述为

$$E_k = \int (P_{Gm} - P_G) dt = \int J_s \omega_m d\omega_m = \frac{1}{2} J_s \omega_m^2 = \frac{1}{2 P_s^2} J_s \omega_e^2 \quad (1)$$

式(1)中: P_{Gm} 、 P_G 分别为同步发电机的机械功率和电磁功率; J_s 、 P_s 分别为转动惯量和定子极对数; ω_m 、 ω_e 分别为系统中同步发电机的机械角速度和电角速度。

根据惯性时间常数的定义有

$$T_s = E_k / S_N = \frac{J_s \omega_e^2}{2 P_s^2 S_N} \quad (2)$$

将式(2)推广到含风电场的区域电网,则可得含风电场系统的惯性时间常数 T_s' 为

$$T_s' = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{J_{s,i} \omega_{e,i}^2}{2 P_{s,i}^2} \right) \sum_{j=1}^m E_{k\omega,j}}{S_N'} \quad (3)$$

式(3)中: $\frac{J_{s,i} \omega_{e,i}^2}{2 P_{s,i}^2}$ 、 $E_{k\omega,j}$ 分别表示系统中各同步发电机和风电机组所储存的动能; S_N' 为引入风电场后电网的总额定容量。

但是,常规风电机组在传统最大功率跟踪控制下,其转速未与系统频率直接耦合,故式(3)中 $E_{k\omega,j} = 0$,因此系统惯性时间常数 T_s' 将随着风电机组的接入而变小,进而会影响区域电网的稳定与安全。

若通过电力电子器件调节变速风电机组有功功率,根据系统频率振荡对系统提供有功支持,即可使变速风电机组具有与同步发电机等效的惯性响应。变速风电机组的转子运动方程可表示为

$$P_m - P_s = J_\omega \omega_r \frac{d\omega_r}{p_\omega^2 dt} \quad (4)$$

式(4)中: p_ω 、 J_ω 分别为机组的极对数和固有转动惯量; P_m 、 P_s 分别为风力发电机的机械功率和定子输出功率,从而推导出风电机组可利用的旋转动能 $E_{k\omega}$ 表达式为

$$E_{k\omega} = \int (P_m - P_s) dt = \int \frac{J_\omega \omega_r d\omega_r}{\omega_s d\omega_s} \times \frac{\omega_s d\omega_s}{p_\omega^2 dt} dt = \int \frac{J_\omega' \omega_s}{p_\omega^2} d\omega_s \quad (5)$$

式(5)中,定义 $J_\omega' = \frac{J_\omega \omega_r d\omega_r}{\omega_s d\omega_s}$ 为风电机组所虚拟出来的惯量,其中 ω_s 为系统的电角速度。

采集电网的频率波动信号,并输入快速有功控制系统,通过控制风电机组转速跟随系统频率变化,即可实现虚拟惯量 J_ω' 恒定,则可由式(5)得到风电机组对系统的动能支持为

$$E_{\omega}' = \frac{1}{2} J_{\omega}' \left(\frac{\omega_e^2}{P_{\omega}} \right). \quad (6)$$

结合式(1)、(2)便可得到变速风电机组的虚拟时间常数为

$$T_{\omega}' = \frac{J_{\omega}' \omega_e^2}{2 P_{\omega}^2 S_{N\omega}}. \quad (7)$$

式(7)中, $S_{N\omega}$ 为变速风电机组的额定容量, 从而式(3)可改写为

$$T_s' = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2 P_{s,i}^2} J_{s,i} \omega_e^2 \right) + \sum_{j=1}^m \frac{1}{2 P_{\omega}^2} J_{\omega,j}' \omega_e^2}{S_N'}. \quad (8)$$

式(8)中, $J_{\omega,j}'$ 、 $P_{s,i}$ 分别为各变速风电机组的虚拟惯量和极对数。

显然, 由式(7)、(8)可以看出, 将系统频率变化信号引入风电机组有功控制系统后, 使变速风电机组虚拟出了与同步发电机相似的惯性响应。

1.2 PMSG 阻尼控制策略

常规 PMSG 的特点为励磁磁场由永磁体提供, 其励磁系统无法根据系统动态振荡产生阻尼作用, 输出功率仅与风速和全功率变流器参数相关, 在电网低频振荡时不能提供功率支持, 因此高风电渗透率电网中将面临弱阻尼的问题。

根据上述分析, PMSG 转速调节范围广, 具备有较同步发电机更加灵活、可控的有功、无功调节潜力。若附加功率控制环节, 使 PMSG 可向系统输入阻尼功率, 即可解决高风电渗透率电网的弱阻尼问题。

1.2.1 有功控制

含 PMSG 电网的等值电路见图 1。图 1 中 G_1 所输出的功率可表示为

$$\begin{cases} P_G = \frac{E' U_G}{X_1} \sin \theta \\ Q_G = \frac{E' U_G}{X_1} \cos \theta - \frac{U_G^2}{X_1} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: U_G 为风电场接入点电压; E' 为 G_1 的 q 轴暂态电势; θ 为 E' 与 U_G 间的相角差; x_1 、 x_2 分别为线路电抗参数。

以母线 B_2 为平衡节点, 假定 G_1 的机械功率 P_m 恒定, 并采用 E 恒定的二阶经典模型, 则 G_1 的运动方程可写为

$$\begin{cases} H_G \frac{d\omega_s}{dt} = P_m - P_G - D(\omega_s - \omega_e) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_s - \omega_e \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: H_G 、 P_G 、 ω_s 分别为 G_1 的惯性时间常数、电磁功率和电角速度; D 为阻尼系数。由式(10)便可得到 G_1 的小扰动运动方程为

$$H_G p^2 \Delta \delta + D p \Delta \delta + \Delta P_G = 0. \quad (11)$$

式(11)中: ΔP_G 为 G_1 的有功微量; p 为微分因子。

为简化分析, 现假定 U_G 恒定, 对式(9)的有功求小扰动量得

$$\Delta P_G = \frac{E' U_G}{X_1} \cos \theta_0 \Delta \theta. \quad (12)$$

将 $P_s = \frac{U_G U}{X_2} \sin(\delta - \theta)$ 带入 $P_s = P_G + P_q$ 并求小扰动量得

$$\frac{U_G U \cos(\delta_0 - \theta_0)}{X_2} (\Delta \delta - \Delta \theta) = \Delta P_G + \Delta P_q. \quad (13)$$

式(13)中: U 为 G_2 端电压; δ_0 、 θ_0 分别为 δ 、 θ 的初始值, 若系统频率波动时, PMSG 有功输出存在与 G_1 角速度增量 $\Delta \omega_s$ 成正比的分量 ΔP_q , 设为

$$\Delta P_q = -K_p \Delta \omega_s = -K_p p \Delta \delta. \quad (14)$$

把式(12)、(14)代入式(13)可得

$$\Delta \theta = \alpha_0 \Delta \delta + \frac{\alpha_0 x_2 K_p}{U_G U \cos(\delta_0 - \theta_0)} p \Delta \delta. \quad (15)$$

式(15)中, $\alpha_0 = \frac{x_1 U \cos(\delta_0 - \theta_0)}{x_2 E' \cos \theta_0 + x_1 U \cos(\delta_0 - \theta_0)}$, 把式(15)带入式(12), 可得到 ΔP_G 再带入式(11)则 G_1 的小扰动方程可表示为

$$\begin{aligned} H_G p^2 \Delta \delta + [D + \frac{\alpha_0 x_2 K_p E' \cos \theta_0}{x_1 U \cos(\delta_0 - \theta_0)}] p \Delta \delta + \\ \frac{\alpha_0 E' U_G}{X_1} \cos \theta_0 \Delta \delta = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可知, 当 $K_p > 0$ 时, 即可增加系统阻尼。

1.2.2 无功控制

设 PMSG 所输的无功功率造成的系统电压波动为 ΔU_G , 并忽略其对其他参量的微小影响, 对式(9)求小扰动量得

$$\begin{cases} \Delta P_G' = \frac{E' U_{G0}}{X_1} \cos \theta_0 \Delta \theta + \frac{E'}{X_1} \sin \theta_0 \Delta U_G \\ \Delta Q_G' = \frac{E' U_{G0}}{X_1} \sin \theta_0 \Delta \theta - \\ \frac{2 U_{G0} - E' \cos \theta_0}{X_1} \Delta U_G = \Delta Q_G + \Delta Q_V \end{cases} \quad (17)$$

显然, 无功增量中仅 ΔQ_V 与 ΔU_G 相关, 因此 ΔQ_V 即为 PMSG 所输出的无功功率。若通过无功控制得到 ΔQ_G 为

$$\Delta Q_G = \Delta Q_V = -k_Q p \Delta \delta = -k_Q 2 \pi f. \quad (18)$$

式(18)中 k_Q 为无功阻尼控制系数。则 ΔU_G 为

$$\Delta U_G = \frac{x_1 k_Q}{2 U_{G0} - E' \cos \theta_0} p \Delta \delta. \quad (19)$$

对式(13)微分得

$$\frac{U_{G0} U \cos(\delta_0 - \Delta \theta)}{X_2} (\Delta \delta - \Delta \theta) + \frac{U \sin(\delta_0 - \theta_0)}{X_2} \Delta U_G = \Delta P_G'. \quad (20)$$

联立式(17)、(20)可解得

$$\Delta \theta = \alpha_0 \Delta \delta + \alpha_1 \Delta U_G. \quad (21)$$

式(21)中, $\alpha_1 = \frac{x_1 U \sin(\delta_0 - \theta_0) - x_2 E' \sin \theta_0}{x_2 E' U_{G0} \cos \theta_0 + x_1 U U_{G0} \cos(\delta_0 - \theta_0)}$, 将式(19)、(21)带入式(17)得到 $\Delta P_G'$, 从而式(11)表示为

$$H_G p^2 \Delta \delta + (D + \frac{\alpha_3 x_1 K_0}{2 U_{G0} - E' \cos \delta_0}) p \Delta \delta + \frac{\alpha_0 E' U_{G0}}{x_1} \cos \theta_0 \Delta \delta = 0. \quad (22)$$

式(22)中, $\alpha_3 = \frac{E' U \sin \delta_0}{x_2 E' \cos \theta_0 + x_1 U \cos(\delta_0 + \theta_0)} > 0$, 显然, 当 $k_Q > 0$ 时, 系统阻尼增加。

2 PMSG-PSS 模型

为充分利用风能资源, PMSG 采用最大功率跟踪控制, 其参考功率与风机转速 ω_r 的对应关系为

$$P_{opt}^* = \begin{cases} k_{opt} \omega_r^3 & \omega_0 < \omega_r < \omega_1 \\ \frac{(P_{max} - k_{opt} \omega_1^3)}{(\omega_{max} - \omega_1)} (\omega_r - \omega_{max}) + P_{max} & \omega_1 < \omega_r < \omega_{max} \\ P_{max} & \omega_r > \omega_{max} \end{cases} \quad (23)$$

在系统振荡过程中, 风电机组可根据系统振荡

频率调节转速为 $\Delta \omega_r = -k_p \Delta \omega_s$, 则由式(23)可得

$$\Delta P_g = \begin{cases} -3k_{opt} k_p \omega_r^3 \Delta \omega_s & \omega_0 < \omega_r < \omega_1 \\ -\frac{(P_{max} - k_{opt} \omega_1^3)}{(\omega_{max} - \omega_1)} k_p \Delta \omega_s & \omega_1 < \omega_r < \omega_{max} \\ 0 & \omega_r > \omega_{max} \end{cases} \quad (24)$$

可见式(24)可实现式(14)的假设, 因而 PMSG 可在系统振荡时增加系统阻尼。同时, PMSG 的网侧变流器有充足的无功裕量, 可快速启动无功阻尼控制, 并满足式(18)。

研究采用机侧变流器控制直流电压, 网侧变流器进行最大功率控制的 PMSG 风机控制模型, 以频率和电压变化量为输入参数, 通过网侧变流器控制 PMSG 电磁功率, 在系统振荡时输出阻尼功率。PMSG 机组的 PSS 模型见图 2。

模块 1 为机侧变流器控制系统, 通过采集直流电压和风机定子电压波动, 将直流功率不平衡转换成风机机械功率 P_m 和电磁功率 P_s 的不平衡, 维持直流电压稳定。

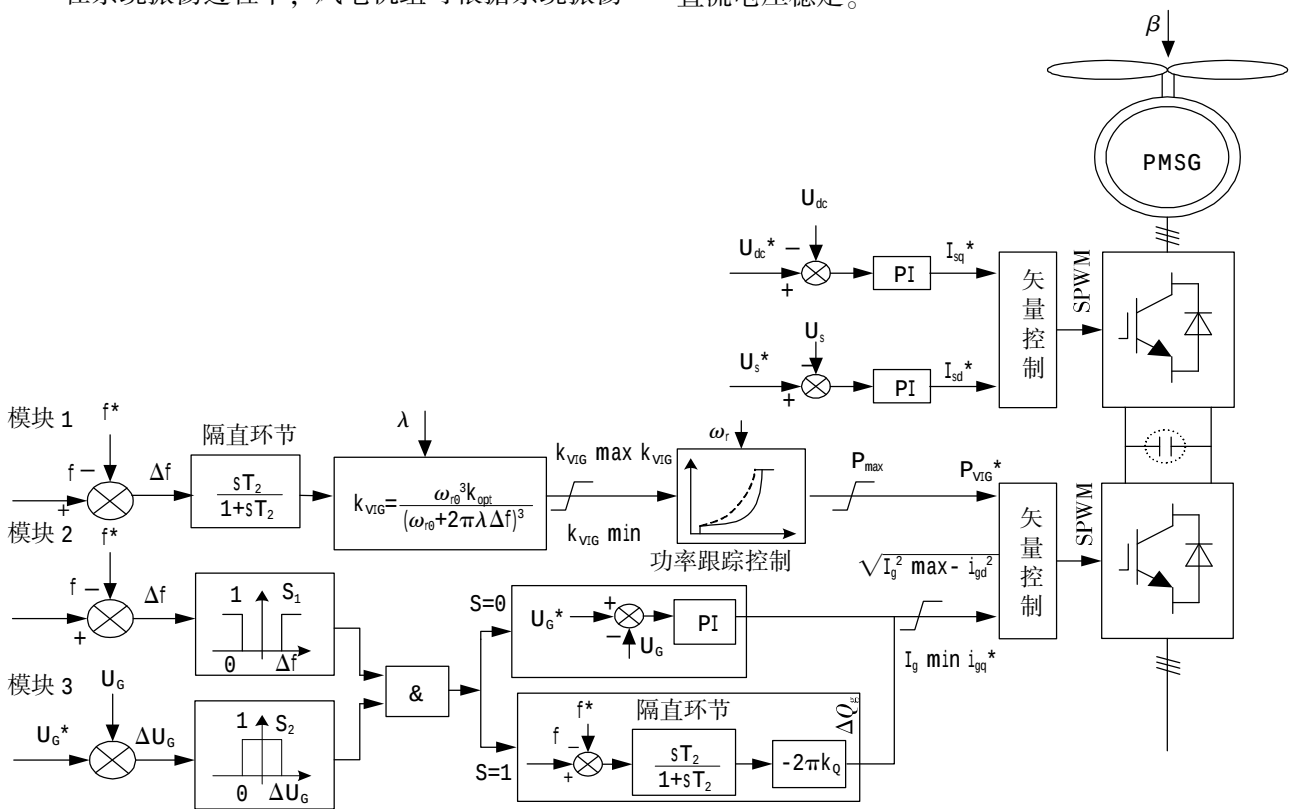


图 2 PMSG 风电机组综合 PSS 控制图

Fig. 2 Integrated PSS control diagram of PMSG

模块 2 为虚拟惯性控制系统, 根据系统频率波动, 通过设定 λ 的值调整最大功率参考曲线, 向系统注入阻尼有功功率, 从而虚拟出风机惯量。

模块 3 为无功阻尼控制系统, 在频率偏差超过整定值, 电压波动在合理范围内时, 根据系统频率偏差利用网侧变流器无功裕量向系统注入无功, 维持

频率稳定。

3 仿真分析

为验证 PMSG 的 PSS 控制模型在高风电渗透率电网中对系统低频振荡的抑制作用, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了风电场接入四机两区域仿真系统

模型,进行模拟验证,见图3。

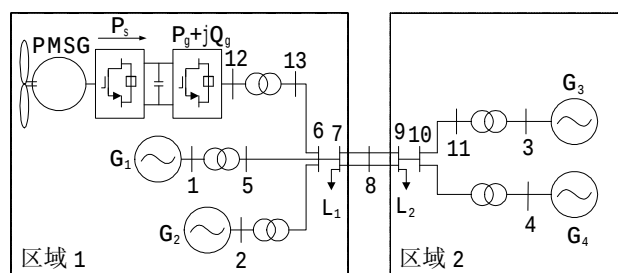


图3 含PMSG风电场两区域仿真系统

Fig. 3 Two-area IEEE power system contains PMSG

仿真系统中风电场由450台2MW的永磁直驱风电机组成,同步发电机额定容量均为900MVA,风电场和火电厂均视为等值机组。负荷 L_1 、 L_2 容量分别为1800、1500MW。假定风电场风速为8m/s,且PMSG机组处于最大功率跟踪状态,分别在不接入风电场、接入常规风电场和接入附加PSS控制的风电场3种运行状态下,设置母线 B_7 在3s时刻发生持续时间为一个周波的三相短路故障。以上3种运行状态下,发电机 G_1 的功率输出响应见图4。

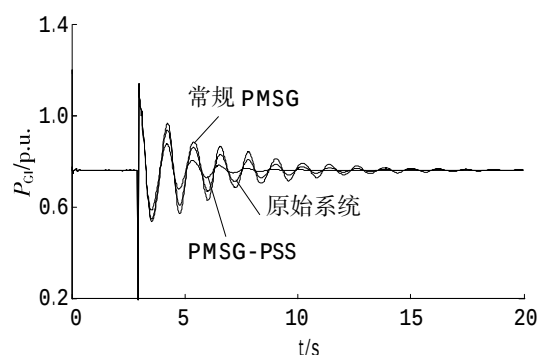


图4 各种电网结构下 G_1 的有功输出

Fig. 4 The active power of G_1 in different power network

利用改进Prony算法分别对上图所示功率输出响应进行辨识,得到其关键振荡模式见表1。

表1 利用Prony辨识出的关键振荡模式特征参数

Table 1 Oscillation modes obtained by Prony algorithm

原始系统		常规 PMSG		PMSG-PSS	
f/Hz	ζ	f/Hz	ζ	f/Hz	ζ
0.83	0.046	0.78	0.035	0.84	0.082
1.44	0.063	1.47	0.056	1.46	0.106

图4对比了3种运行状态的发电机 G_1 的功率响应,可见在接入常规控制风电场后加剧了系统故障时的功率振荡,风电场附加PSS控制后对系统振荡起到了削弱作用,且功率振荡较原始两区域系统更快趋于稳定。

由表1可以看出,原始系统存在有0.83、1.44Hz两个关键振荡模式,其阻尼比分别为0.046、0.063;

接入常规风电场后系统关键振荡模式有0.78、1.47Hz两个,阻尼比为0.35、0.056;风电场附加PSS控制后关键振荡模式有0.84、1.46Hz两个,阻尼比为0.082、0.106。可见,接入常规PMSG风电场削弱了系统阻尼,而对风机附加PSS控制器后系统阻尼得到有效加强,且优于原始两区域系统。

综合上述分析,常规PMSG风电场接入系统后,由于其不能在系统故障时提供功率支持,反而会加剧系统振荡;在风电场附加PSS控制后具备了与同步发电机类似且更优的功率调节能力,可缩短电网故障后频率振荡时间,提高系统的频率稳定性。

4 结语

目前,国内风电机组还不具备分担振荡功率的能力,随着风电装机容量在电网中占比的不断提高,将会相对削弱系统阻尼。文中提出了PMSG机组附加PSS的控制方案,使PMSG风电场可在电网故障振荡时向系统注入阻尼功率,从而改善含高风电渗透率电网的阻尼特性,提高系统稳定性。

经过仿真实验,验证了该方案不但可解决大规模风电接入电网削弱系统阻尼的问题,而且可利用PMSG机组灵活的功率调节范围抑制系统低频振荡,协助系统功率调整,提高系统稳定性。

参考文献:

- [1] 李军军,吴政球.风电参与一次调频的小扰动稳定性分析[J].中国电机工程学报,2011,31(13):1-9.
LI Junjun, WU Zhengqiu. Small signal stability analysis of wind power generation participating in primary frequency regulation[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(13): 1-9.
- [2] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [3] 张明理,徐建源,李佳珏.含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J].电网技术,2013,37(3):740-745.
ZHANG Mingli, XU Jianyuan, LI Jiajue. Research on transient stability of sending power grid containing high proportion of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 740-745.
- [4] KIM K H, JEUNG Y C, LEE D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376-2384.
- [5] 曹军,王虹富,邱家驹.变速恒频双馈风电机频率控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(13):78-82.

- CAO Jun, WANG Hongfu, QIU Jiaju. Frequency control strategy of variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 78-82.
- [6] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 152-158.
- ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [7] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 63-70.
- WANG Chen, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Small signal stability analysis of the large-scale wind farm with DFIGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 63-70.
- [8] 杜雄, 李珊瑚, 刘义平, 等. 直驱风力发电故障穿越控制方法综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 129-135.
- DU Xiong, LI Shanhu, LIU Yiping, et al. Review of fault ride-through control for direct-drive wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 129-135.
- [9] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 20-25.
- ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25.
- [10] 杜威, 姜齐荣, 陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 26-31.
- DU Wei, JIANG Qirong, CHEN Jiaorui. Frequency control strategy of distributed generations based on virtual inertia in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 26-31.
- [11] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
- FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [12] 关宏亮, 迟永宁, 戴慧珠, 等. 并网风电场改善系统阻尼的仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 81-85.
- GUAN Hongliang, CHI Yongning, DAI Huizhu, et al. A simulation on wind farm integration in improving power system damping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 81-85.
- [13] 张祥宇, 王毅, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组改善系统阻尼的控制技术[J]. 电测与仪表, 2013, 50(2): 26-31.
- ZHANG Xiangyu, WANG Yi, LI Heming, et al. Damping improvement of power system using PMSG-based wind turbine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(2): 26-31.
- [14] 李和明, 张祥宇, 王毅, 等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 32-39.
- LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39.
- [15] 卢卫青, 邵如平. 基于DFIG-PSS抑制含风电的电力系统低频振荡方法[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 161-163.
- LU Weiqing, SHAO Ruping. Suppressing low frequency oscillation of power system with wind power generation based on DFIG-PSS[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 161-163.
- [16] 王毅, 张祥宇, 李和明, 等. 永磁直驱风电机组对系统功率振荡的阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 162-171.
- WANG Yi, ZHANG Xiangyu, LI Heming, et al. Damping control of PMSG-based wind turbines for power system oscillations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 162-171.
- 彭章刚(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制、调度自动化及计算机信息处理研究。
- 周步祥(1965—), 男, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机信息处理研究。
- 冯超(1987—), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护与变电检修工作。