



引用格式:和萍,史峰,耿斯涵,等.风电并网容量与消纳模式对互联电网小干扰稳定性的影响[J].轻工学报,2016,31(2):66-73.

中图分类号:TM712 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2016.2.009

文章编号:2096-1553(2016)02-0066-08

风电并网容量与消纳模式对互联电网小干扰稳定性的影响

Impacts of wind power integration capacity and accommodation on small signal stability of interconnected power systems

和萍,史峰,耿斯涵,崔光照

HE Ping, SHI Feng, GENG Si-han, CUI Guang-zhao

关键词:

互联电力系统; 风电
并网; 风电消纳模式;
小干扰稳定性

郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002

College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

Key words:

interconnected power
system; wind power
integration; wind power
accommodation mode;
small signal stability

摘要:针对风电并网容量与消纳模式对互联电网小干扰稳定性的影响问题,基于完整的双馈风力发电机组模型,采用特征根分析和时域仿真分析方法,以两区域4机系统为例,分析了不同风机出力、不同消纳模式下系统振荡模式和动态响应曲线。结果表明,风电机组并网能够增强互联电力系统的阻尼比,风电机组处于本地消纳模式时有利于减小区域间的低频振荡。

收稿日期:2015-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51507157);郑州轻工业学院博士科研基金项目(2014BSJJ043);郑州轻工业学院青年骨干教师项目

作者简介:和萍(1980—),女,河南省鄢陵县人,郑州轻工业学院讲师,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析控制、风电并网等。

通信作者:崔光照(1957—),男,河南省洛宁县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制。

Abstract: Aiming at the impacts of wind power integration capacity and accommodation on small signal stability of interconnected power systems, based on the comprehensive model of the doubly fed induction generator (DFIG), detailed analysis of different wind turbine output and accommodation, the system oscillation mode and dynamic response curve under accommodation mode were carried out on a two-area four generators system by using the eigenvalue analysis and dynamic time-domain simulation. Results showed that wind turbine generator accommodation could increase the damping of interconnected power system and decrease low frequency oscillation in mode of accommodation on distance.

0 引言

随着生态环境的恶化及化石能源的逐渐枯竭,对新能源的开发和利用已经成为当下能源科学技术研究的热点^[1]. 风能具有可再生、零污染、储量丰富等特点,其在保护环境、缓解能源危机、可持续发展等方面的优势越来越明显^[2-3]. 但风电与火电、水电、核电不同,它受气候、地域、季节等自然环境的制约,电力不太集中,须大规模集中并网方能为产业提供电能,这就带来了互联系统的安全稳定尤其是区域间的低频振荡问题^[4-5].

近年来,国内外针对风电场并入电网后电力系统的稳定问题做了大量研究^[6-20]. 风电机组并网对电力系统阻尼特性影响的研究由 J. G. Siootweg 等^[6]在 2003 年最先发起. 随后大量文献^[7-12]多集中在采用特征值分析法研究风电并网对系统低频振荡及小干扰稳定性的影响等方面;文献[13]考虑并网容量的不同,分析了 WSCC 3 机 9 节点中双馈风电机组并网后对电力系统低频振荡特性的影响;文献[14]以北欧电网实际模型为例,从区域间振荡模态角度分析了不同类型的风电机组对互联系统的影响;文献[15-16]认为单机大容量是风电未来发展的主要趋势,并分析了在不同风况和系统容量下风电并网对系统稳定性的影响;文献[17-18]分别以通辽电网和京津唐电网风电基地并网方案为例,针对风电场集中并网后系

统运行情况及控制对策进行了阐述.

在实际风电投运系统中,风电场接入电网的消纳方式一般有两种:一是当风电场容量较小时,作为一种分布式电源分散接入地区配电网,以就地方式消纳;二是当风电场容量较大时,作为集中开发风电基地接入高压输电通道,以远方输送方式消纳,如海上风电,以及类似内蒙古、张家口、酒泉等 10^7 kW 级风电基地.

虽然针对风电并网对电力系统安全性和稳定性的影响已取得了一些研究成果,然而,目前文献对于综合考虑并网容量和风电消纳方式对互联系统小干扰稳定性的影响尚缺乏整体研究. 本文拟以文献[6-16]的成果为基础,构建基于双馈感应发电机 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 的风电机组数学模型,研究风电并网容量与消纳方式对互联电网小干扰稳定性的影响,以期为全面分析互联系统风电场入网规划和运行提供参考.

1 风电机组数学模型

本文以目前应用最广泛的基于双馈感应发电机的风电机组为对象,构建其动态模型框图,如图 1 所示. DFIG 定子直接与电网相连,而转子经脉宽调制变换器与系统相连,以实现有功、无功的解耦控制. 其中, v 为风速; T_m 和 T_e 分别为风机输出机械转矩和发电机转子机械电磁转矩; ω_l 和 ω_g 分别为风力机转速和发电机转速; θ_g 为发电机转子角; β 为桨距角, β_{ref} 为桨距角

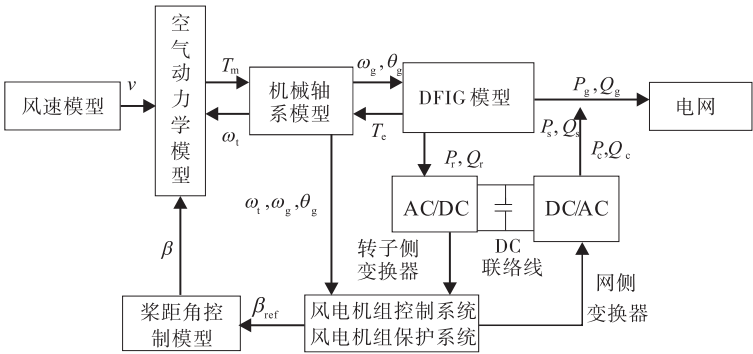


图 1 风电机组动态模型框图

Fig. 1 The dynamic model configuration of wind turbine generator

参考值; P 和 Q 为有功功率和无功功率, 其中下标 s 表示定子发出功率, r 表示转子发出功率; P_c 和 Q_c 为网侧变换器从电网吸收的有功功率和无功功率; P_g 和 Q_g 为双馈电机风电系统流入电网的有功功率和无功功率。

1.1 空气动力学模型

由流体力学可知, 风功率

$$P_w = 0.5 \rho \pi R^2 v^3$$

式中, R 为叶片半径, ρ 为空气密度, P_w 为当风吹过风机叶片前所具有的风能. 风能转化为机械能的多少取决于风能利用系数 C_p , 由贝茨理论可知, C_p 最大值为 0.593, 则

$$P_M = C_p P_w = 0.5 \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3$$

式中, P_M 为风机捕获的风能, 叶尖速比 $\lambda = \omega R / v$. 则

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22(116/\lambda_0 - 0.4\beta - 5)e^{\frac{-12.5}{\lambda_0}}$$

其中, $\lambda_0 = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0.88\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \right)$, 由上式可知, 风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 是叶尖速比和桨距角的函数, 风机性能曲线如图 2 所示。

由图 2 可见, 当 β 逐渐增大时, $C_p(\lambda)$ 明显减小. 若 β 保持不变, C_p 则只与 λ 有关, 可以用一条 $C_p(\lambda)$ 曲线来描述. 由此可推导出风速与机械转矩的关系为

$$T_m = 0.5 \pi \rho C_p(\beta, \lambda) R^3 v^3 / \lambda$$

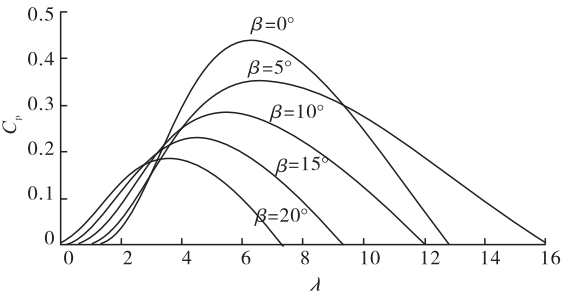


图 2 风机的性能曲线

Fig. 2 Property curves of wind turbine

1.2 轴系模型

传动装置一般采用两质量模块^[7]模型, 其轴系模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{1}{2H_g}(T_{sh} - T_e - D_t\omega_g) \\ \frac{d\theta_t}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_g) \\ \frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t}(T_m - T_{sh}) \end{cases}$$

式中, H_t 和 H_g 分别为风机和发电机的惯性时间常数, θ_t 和 ω_b 分别为轴系扭曲角度和系统同步转速, D_t 为风机的阻尼系数, T_{sh} 为风机轴系转矩。

1.3 DFIG 模型

DFIG 采用绕线式异步电机在 $d-q$ 坐标系下的标幺制 4 阶模型^[19], 即

$$\begin{cases}
\frac{X_s' di_{ds}}{\omega_s dt} = -\left(r_s + \frac{x_s - x_s'}{\omega_s T_0'}\right) i_{ds} + X_s' i_{qs} + v_{ds} - \\
(1 - s_r) e_{ds}' + \frac{1}{\omega_s T_0'} e_{qs}' - \frac{L_m}{L_r} v_{dr} \\
\frac{X_s' di_{qs}}{\omega_s dt} = -\left(r_s + \frac{x_s - x_s'}{\omega_s T_0'}\right) i_{qs} - x_s' i_{ds} + v_{qs} - \\
(1 - s_r) e_{qs}' - \frac{1}{\omega_s T_0'} e_{ds}' - \frac{L_m}{L_r} v_{qr} \\
\frac{de'_{ds}}{dt} = s_r \omega_s e_{qs}' - \omega_s \frac{L_m}{L_r} v_{qr} - \\
\frac{1}{T_0'} [e_{ds}' + (x_s - x_s') i_{qs}] \\
\frac{de'_{qs}}{dt} = -s_r \omega_s e_{ds}' + \omega_s \frac{L_m}{L_r} v_{dr} - \\
\frac{1}{T_0'} [e_{qs}' - (x_s - x_s') i_{ds}]
\end{cases}$$

式中, Ψ_{dr} 和 Ψ_{qr} 分别为转子磁通的 d - q 轴分量; L_s 和 L_r 分别为定子自感和转子自感; r_s , r_r , x_s , x_s' 分别为定子电阻、转子电阻、定子电抗和定子暂态电抗; e'_{ds} 和 e_{qs}' 为后暂态电势的 d - q 轴分量; T_0' 为转子时间常数; i_{ds} , i_{qs} 为定子电流的 d - q 轴分量; v_{ds} , v_{qs} 和 v_{dr} , v_{qr} 分别为定子电压和转子电压的 d - q 轴分量。

1.4 桨距角模型

为了使风轮机输出平稳并提高风能转换效率,通常桨距角的控制模型见式①,框图如图3所示。

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{t}{T_\beta} (\beta_{ref} - \beta) \quad (1)$$

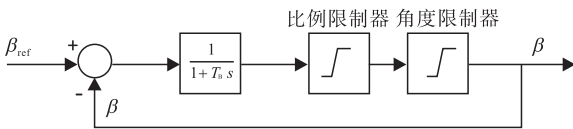


图3 桨距角控制系统模型图

Fig. 3 Control diagram of pitch control strategy

1.5 变换器模型

DFIG 励磁电压由机侧变换器提供,网侧变换器电容电压由直流调节系统控制维持;2个

变换器的直流侧由共同的电容器 DC 提供电压支撑. 其功率方程可以表示为

$$\begin{cases}
P_r = P_g + P_{DC} \\
P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\
P_g = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} \\
P_{DC} = v_{DC} i_{DC} = -C v_{DC} dv_{DC}/dt
\end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{DC} 为 DC 联络线有功功率; i_{dr} 和 i_{qr} 为转子电流的 d - q 轴分量; i_{dg} , i_{qg} 和 v_{dg} , v_{qg} 分别为网侧变换器电流和电压的 d - q 轴分量; i_{DC} 和 v_{DC} 分别为电容器 DC 的电流和电压; C 为电容量。

由式②可得

$$C v_{DC} \frac{dv_{DC}}{dt} = v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg} - (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr})$$

2 系统小干扰稳定性分析

小干扰稳定性表征电力系统在遭受小干扰后维持同步运行的能力. 在含风电机组或有风电并网的电力系统小干扰稳定性研究中,小干扰稳定分析通常以线性系统理论和 Lyapunov 第一定律为理论基础,将描述电力系统动态特性的微分-代数方程在稳定运行点 (x_0, y_0) 处线性化,线性化后的电力系统模型用状态空间形式表示为

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x$$

式中, Δx 为描述系统动态特性的状态变量增量, A 为系统的状态矩阵. 后续根据 A 的特征值和特征向量判断系统的小干扰稳定性。

对于复特征值 $\lambda = \sigma + j\omega$, 相应的振荡频率 $f = \omega/2\pi$, 其对应的阻尼比定义为

$$\xi = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (3)$$

参与因子可用来描述状态变量与模态之间的关联程度,第 i 个状态变量对第 j 个特征根的参与因子

$$p_{ij} = \frac{w_{ij} v_{ji}}{w_j^T v_j}$$

其中,对任一特征值 λ_i , 当 n 列向量 w_i 满足 $A w_i = \lambda_i w_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 时, w_i 称为 λ_i 的右特征向量; 当 n 行向量 v_i 满足 $v_i A = v_i \lambda_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 时, v_i 称为 λ_i 的左特征向量.

3 算例分析

3.1 算例

本文选用图 4 所示的两区域 4 机系统,该系统包括由一条弱联络线连接的两个区域系统,每个区域都有两台紧密耦合的机组,具体参数见文献[21]. 在实际风电并网系统中,风电场一般含有数台风电机组,本研究为了简化分析,采用单台风电机组模型作为风电场的集总模型来模拟整个风电场.

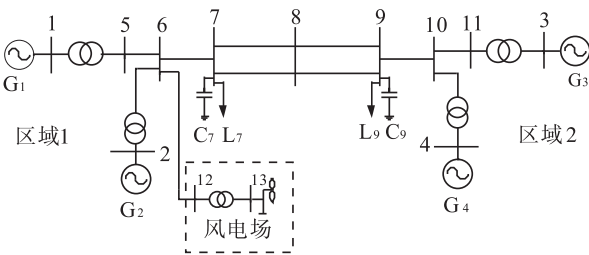


图 4 两区域 4 机系统示意图

Fig. 4 Two-area four generators system

3.2 风机并网容量对系统的影响

初始系统 3 个 PV 节点发出的有功功率均为 700 MW, 逐步增加风电机组的出力至 40 MW, 100 MW, 130 MW, 为保证联络线传输功率不变, 调整相应母线 2 处或 4 处同步机组出力. 表 1 为不同风机出力系统的部分特征根, 表中渗透率指风机出力占总负荷的百分比, 相关机组由式③计算的相关因子得到. 风机出力 100 MW 时系统全部特征根分布如图 5 所示.

由表 1 可知, 风电机组并网前系统有两个局域振荡模式(模式 1 和模式 2), 以及一个区域间振荡模式(模式 3); 风电机组并网后, 系统增加了一个新的局部振荡模式(模式 4) 和与风机相关的模式(模式 5). 原有的振荡模式中, 模

表 1 不同风机出力下系统的部分特征根

Table 1 Eigenvalues of system with different wind turbine output

风机出力/MW	渗透率/%	模式	特征根	频率/Hz	阻尼比	相关机组
0	0	1	$-0.766\ 4 \pm 6.646\ 0$	1.064 8	0.114 6	G_1, G_2
		2	$-0.979\ 1 \pm 6.744\ 1$	1.084 6	0.143 7	G_3, G_4
		3	$-0.414\ 2 \pm 4.255\ 6$	0.680 5	0.096 9	G_1, G_3
40	1.36	1	$-0.775\ 9 \pm 6.651\ 7$	1.065 8	0.115 9	G_1, G_2
		2	$-0.974\ 4 \pm 6.752\ 5$	1.085 8	0.142 8	G_3, G_4
		3	$-0.412\ 5 \pm 4.311\ 5$	0.689 3	0.095 2	G_1, G_3
		4	$-0.355\ 8 \pm 1.061\ 1$	0.700 9	0.317 9	G_1, G_3
		5	-5.800 6	0	1	DFIG
100	3.41	1	$-0.817\ 8 \pm 6.585\ 5$	1.056 2	0.123 2	G_1, G_2
		2	$-0.974\ 9 \pm 6.759\ 6$	1.087 0	0.142 8	G_3, G_4
		3	$-0.412\ 3 \pm 4.320\ 3$	0.690 7	0.095 0	G_1, G_3
		4	$-0.373\ 2 \pm 1.092\ 3$	0.711 1	0.323 3	G_1, G_3
		5	-6.351 0	0	1	DFIG
130	4.43	1	$-0.840\ 4 \pm 6.542\ 9$	1.049 9	0.127 4	G_1, G_2
		2	$-0.976\ 9 \pm 6.762\ 6$	1.087 5	0.142 9	G_3, G_4
		3	$-0.414\ 0 \pm 4.319\ 7$	0.690 7	0.095 4	G_1, G_3
		4	$-0.342\ 4 \pm 0.846\ 6$	0.145 3	0.374 9	G_1, G_3
		5	-53.278 1	0	1	DFIG

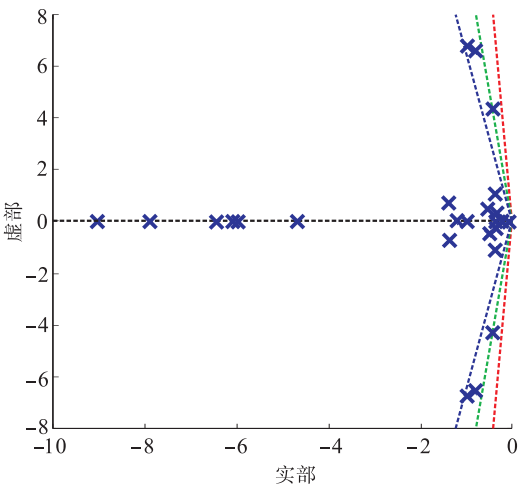


图 5 风机出力 100 MW 时特征根分布情况

Fig. 5 Distribution of eigenvalues with 100 MW wind turbine output

式 1 和模式 2 的阻尼比在风电并网后有所提升, 随着并网容量的增加, 阻尼比也随之增加; 模式 3 的阻尼比先下降之后又有所回升.

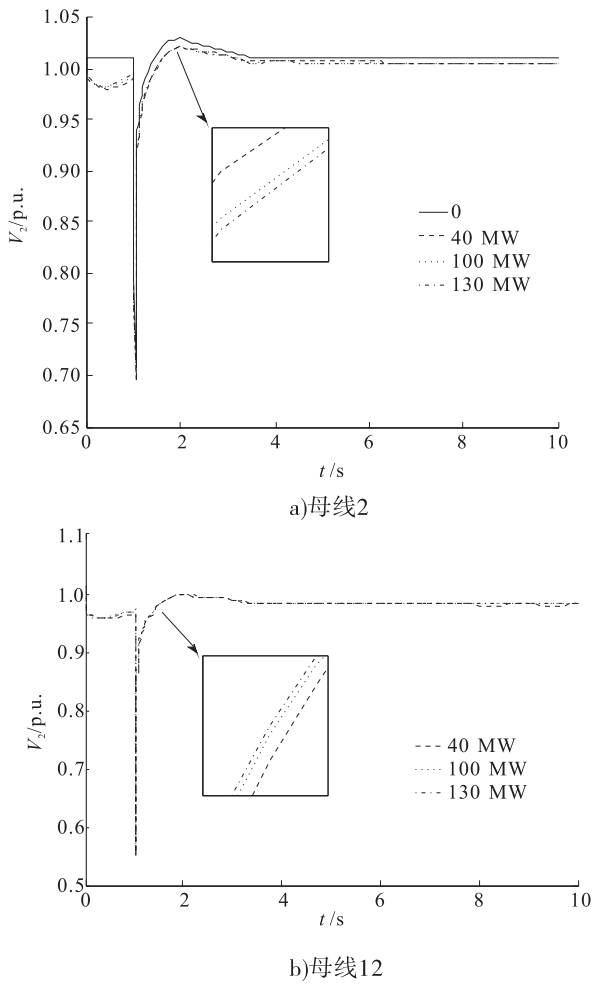


图6 不同风机并网容量时母线电压响应曲线

Fig. 6 Response curve of bus voltage with different wind turbine output

当系统在1 s时母线8发生短路,不同风机并网容量下母线电压响应曲线如图6所示,2[#]机组响应曲线如图7所示。

图6给出了母线2及母线12电压变化曲线,可以看出:在没有风机并网时,故障前母线2电压稳定,出现故障时发生突降;并入风机时故障前电压出现小幅下降之后再回升,在出现故障时突降.故障切除后电压回升,并超过额定电压之后回落至稳定运行,通过对比可以发现并入风机后母线2的电压比无风机时有所下降.由母线12电压曲线可知,风机在故障发生的瞬间电压突降,故障被切除后先回升后小幅降落至稳定运行。

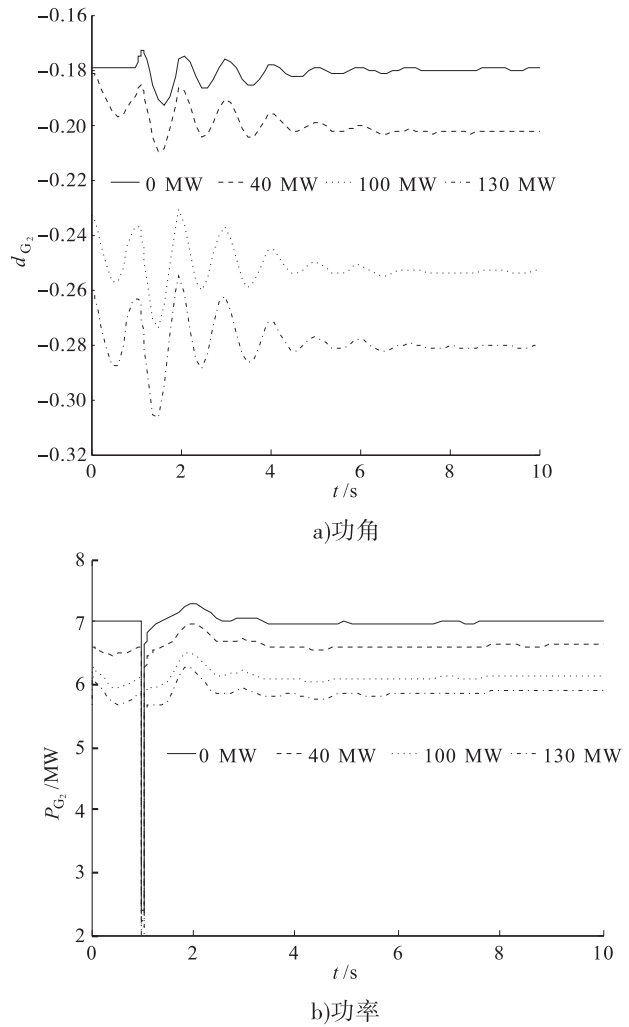
图7 不同风机并网容量时2[#]机组响应曲线Fig. 7 Response curve of unit G_2 with different wind turbine output

图7中功角响应曲线取1[#]机组功角为参考值,由曲线可以看出,2[#]机组在没有风电并网时故障前的功角与1[#]机组保持同步,故障后发生波动并在7 s后恢复同步.随着风电并网容量的增加,2[#]机组功角波动也随之增大。

3.3 不同消纳模式对系统稳定性的影响

改变风机并网位置,由原来的与母线2并联改为与母线4并联,风机出力为100 MW.此时联络线功率由区域1向区域2(母线7流向母线9)传输,则风机为本地消纳模式.与3.2相同工况下,可得到表2所示的特征根和图8所示的响应曲线。

对比表 1 和表 2 可知,在本地消纳模式下,1[#]和 2[#]机组之间的局域振荡模式阻尼比下降;3[#]和 4[#]机组之间的局域振荡模式以及 1[#]和 3[#]机组之间的区域振荡阻尼比均有提升.由此可以得出,风电机组处于本地消纳模式时有利于减小

小区域间的低频震荡.

由图 8 所示响应曲线与图 6,图 7 对比可以看出,本地消纳模式的母线电压响应与远方消纳模式相似.与风机并联的 4[#]机组功角振荡幅度减小,但振荡时间有所增加.由 4[#]机组的功率曲线可以看出,故障切除后 4[#]机组的功率先回升之后又下降,最后经历振荡并保持稳定运行.

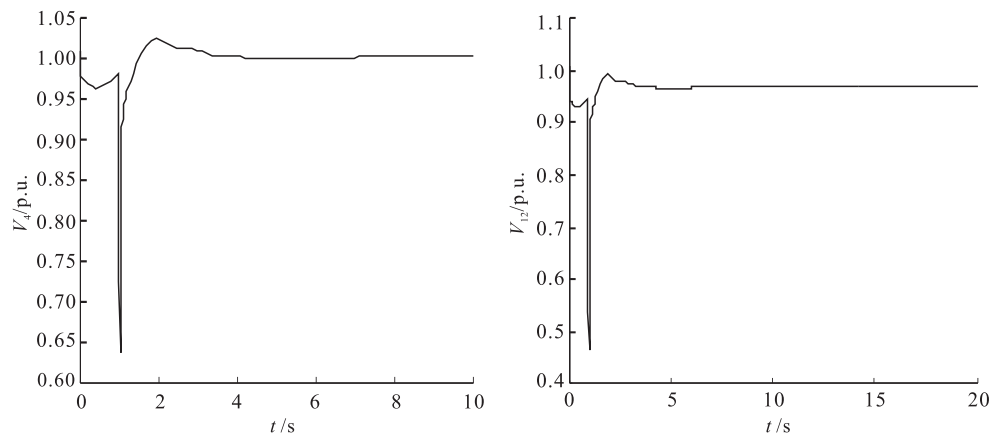
4 结论

为研究综合考虑并网容量和风电消纳模式对互联系统小干扰稳定性的影响,基于双馈感应发电机风电机组模型,以两区域 4 机系统为例,分析了不同风电出力、不同消纳模式下系统

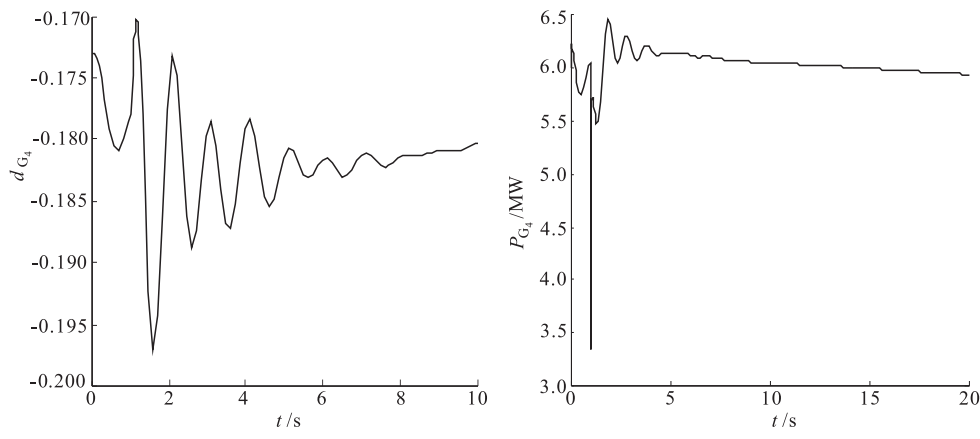
表 2 风机在母线 4 并网时系统部分特征根

Table 2 Eigenvalues of system with wind turbine intigrated at bus 4

风机出力/MW	模式	特征根	频率/Hz	阻尼比	相关机组
100	1	-0.759 7 ± 6.662 8	1.067 3	0.113 3	G ₁ , G ₂
	2	-1.056 5 ± 6.653 5	1.072 2	0.156 8	G ₃ , G ₄
	3	-0.420 9 ± 4.314 6	0.689 9	0.097 1	G ₁ , G ₃
	4	-0.292 8 ± 0.790 7	0.134 2	0.347 3	G ₁ , G ₃
	5	-108.744 8	0	1	DFIG



a) 不同母线电压响应曲线



b) G₄响应曲线

图 8 本地消纳模式下系统响应曲线

Fig. 8 Response curve of system with accommodation on distance

振荡模式和动态响应曲线,得出如下结论.

1) 调节风电机组输出功率,同时调节同步发电机的输出功率,保持系统联络线传输功率不变,系统的阻尼比随着风电并网容量的增加呈现上升趋势.

2) 改变风机的并网位置,本地消纳模式下系统区域间低频振荡的阻尼比比远方消纳模式高,风电的本地消纳模式较为有利.

3) 风电并网后,与风机并联的同步电机功角波动随着风机出力增大而增大,风电场的加入对系统功角波动有一定影响.

参考文献:

- [1] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [2] 刘志远, 彭秀芳, 冯莉黎. 风电场风能资源储量和技术开发量估算方法[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 45.
- [3] ABDULLAH A, FEKIH A. An overview of the current state of wind energy technology development in the US[C] // GREENTECH'13 Proceedings of the 2013 IEEE Green Technologies Conference, Washington DC: IEEE Computer Society, 2013: 120 - 126.
- [4] 杨东俊, 李继升, 丁坚勇, 等. 大区互联电网振荡频率特性分析[J]. 华中电力, 2012, 25(1): 71.
- [5] 孙正龙, 王雨薇. 浅谈互联电网低频振荡的分析与控制方法[J]. 黑龙江科技信息, 2015, 36: 180.
- [6] SIOOTWEG J G, KLING W L. The impact of large scale wind power generation on power system oscillations [J]. Electric power systems research, 2003, 67(1): 9.
- [7] 关宏亮. 大规模风电接入电力系统的小干扰稳定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [8] 邓卫, 唐西胜, 齐智平. 异步风力发电机对微网稳定性的影响与对策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 32.
- [9] YANG L H, YANG G Y, XU Z, et al. Optimal controller design of a doubly-fed induction generator wind turbine system for small signal sta-

bility enhancement [J]. IET generation, transmission and distribution, 2010, 4(5): 579.

- [10] 常勇, 徐政, 郑玉平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 70.
- [11] MISHRA Y, MISHRA S, LI F, et al. Small signal stability analysis of a DFIG-based wind power system under different modes of operation[J]. IEEE trans on energy conversion, 2009, 24(4): 972.
- [12] SHI L B, KANG L, NI Y X, et al. Small signal stability analysis with penetration of grid-connected wind farm of PMSG type[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(8): 171.
- [13] 杨黎晖, 马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 19.
- [14] HAGSTROM E, NORHEIM I, UHLEN K. Large scale wind power integration in Norway and effect on damping in the Nordic grid[J]. Wind energy, 2005, 8(3): 375.
- [15] 熊来红, 单瑞卿, 汪皓钰, 等. 不同风况和系统容量下双馈风机并网谐波特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(12): 106.
- [16] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399.
- [17] 李付强, 沈卫东, 王彬. 大规模风电并网对京津唐电网的影响和对策分析[J]. 电力技术, 2009(10): 44.
- [18] 杨涛, 郑涛, 迟永宁, 等. 大规模风电外送对电力系统小干扰稳定性影响[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 20.
- [19] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043.
- [20] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61.
- [21] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.