

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.002

弱电网下双馈风力发电系统的稳定性极限研究

黄云辉¹, 王凌云¹, 喻恒凝¹, 王栋¹, 朱国荣¹, 黄云虹²

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070;

2. 湖北白莲河抽水蓄能有限公司, 湖北 黄冈 438000)

摘要:针对大规模风电机组接入电力系统导致电网强度变弱,引起直流电压时间尺度的不稳定问题,文中研究了弱交流电网下双馈风机(DFIG)的稳定性极限。首先,研究DFIG注入电网的有功功率、端电压与转子 dq 轴电流间的关系以及稳定性极限的物理约束,并进行灵敏度分析,总结有功功率对转子 d 轴电流的灵敏度的变化规律;然后,建立连接弱电网的DFIG的小信号模型,通过特征根轨迹分析,研究DFIG控制环路的动态行为对其稳定性极限的影响。结果表明,在极弱电网情况下,等阻尼降低锁相环(PLL)带宽或提高端电压环带宽可提高稳定性极限;若不考虑动态无功支撑,DFIG的稳定运行功角限制在 50° 左右,若考虑所有控制环路的动态过程,DFIG的运行功角极限约为 60° 。

关键词:弱电网;双馈风机(DFIG);稳定性极限;端电压控制;锁相控制;特征值分析

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0009-09

0 引言

风力发电在各国供电体系中所占的比例不断提高。双馈风机(double-fed induction generator, DFIG)发电技术以其高效率 and 相对较小的变换器容量,得到了大规模的应用^[1]。我国风电装机和风电发电量位居世界第一,但风电基地大多远离负荷中心,风场并网点电网强度偏弱,且风力发电系统中大量传统电磁变换装备被电力电子装备所取代,而大规模风电机组接入电网使整个电力系统动态特性复杂化^[2-5]。与此同时,电力系统出现了一些直流电压时间尺度(10 Hz级)上的不稳定问题^[6-9]。经研究,该时间尺度的振荡问题与风电场和基于电压源换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)之间的相互作用有关^[10-11]。因此,针对直流电压时间尺度DFIG的稳定性研究尤为重要。

目前针对DFIG稳定性分析已有一些研究。文献[12]研究了风机锁相环(phase locked loop, PLL)振荡模态与同步机功角振荡模态变化时,两者阻尼的变化特性,该分析基于机电时间尺度,未关注风机的自身特性,不适用于直流电压时间尺度稳定性问题。文献[13-14]基于直流电压时间尺度,发现电网强度及PLL参数分别影响了PLL的相频特性及幅频特性,且较大的PLL增益可有效提高系统阻

尼。以上分析局限于PLL参数对不同时间尺度下DFIG稳定性的影响,研究不够深入。文献[15]提出DFIG的动态性能很大程度上取决于其变换器的控制,认为弱电网情况下变换器控制回路间的耦合作用会引起稳定性问题,具有一定参考价值,但仍未对风机稳定性约束及其他控制回路对风机稳定性极限影响的物理机制展开研究。部分学者对VSC的稳定性极限进行了研究。文献[16-17]研究PLL控制参数对风机稳定性的制约作用,发现PLL带宽接近直流电压环带宽时,会影响直流电压环的稳定,而PLL增益过小会制约VSC的最大功率转移能力;文献[18-19]对弱电网下VSC的功率控制稳定性制约因素展开了研究,并探究了控制回路相互作用对VSC的功率稳定性极限的影响,发现直流电压环与PLL控制回路间的相互作用将会限制功角,可保证无动态无功功率的稳定运行。然而,早期文献对DFIG的稳定性极限的研究较少,特别是对接入弱电网的DFIG稳定性极限问题鲜有涉及。

文中首先基于DFIG接入弱交流电网的等效电路模型,推导DFIG注入电网的有功功率、端电压与转子 dq 轴电流间的关系特性,探究DFIG功率稳定性的物理约束。随后基于搭建的小信号模型,结合特征值分析法,探究忽略端电压环动态过程及考虑所有控制回路动态过程2种情况下,不同电网强度、不同运行功角以及不同PLL控制参数等对DFIG稳定性的影响。文中研究工作的意义在于填补了接入弱电网的DFIG稳定性极限问题研究的空白,揭示弱电网下控制回路动态过程对DFIG稳定性极限

收稿日期:2022-02-18;修回日期:2022-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777146);湖北省自然科学基金资助项目(2020CFB135)

的影响,并从控制层面提出了提高 DFIG 稳定性极限的措施。

1 DFIG 控制系统

DFIG 系统及其控制原理如图 1 所示。

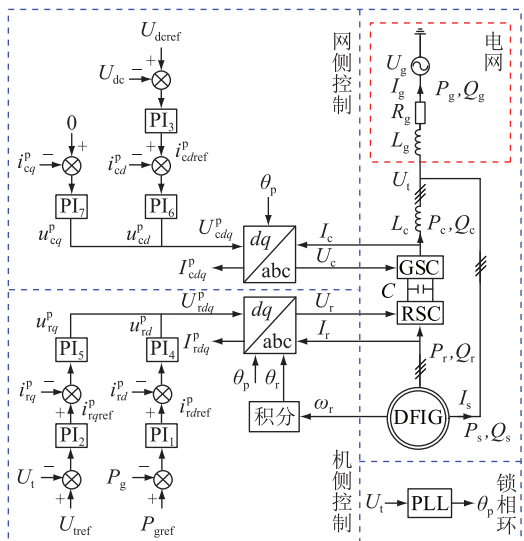


图 1 DFIG 发电系统及其控制原理

Fig.1 DFIG system and its control principle

图 1 中, $P_s, Q_s, P_c, Q_c, P_r, Q_r$ 分别为 DFIG 定子输出有功和无功功率、网侧变流器输出有功和无功功率、转子侧变流器输出有功和无功功率; P_g, Q_g 分别为 DFIG 系统整体注入电网的有功和无功功率; U_g, U_{dc}, U_t 分别为电网电压、直流电容电压和端电压; U_c, I_c, U_r, I_r 分别为网侧变流器输出电压和电流、转子侧变流器输出电压和电流; $U_{cdq}^p, I_{cdq}^p, U_{rdq}^p, I_{rdq}^p$ 分别为网侧变流器 dq 轴电压和电流、转子侧变流器 dq 轴电压和电流; I_s 为定子输出电流; I_g 为 DFIG 输出电流; θ_p, θ_r 分别为 PLL 输出角度和转子转速角度; C, ω_r 为直流电容和转子转速; $U_{dref}, i_{cdref}^p, i_{rdref}^p, i_{tqref}^p$ 分别为直流电容电压指令值、网侧变流器 d 轴电流指令值、转子侧变流器 d 轴电流指令值和转子侧变流器 q 轴电流指令值; U_{tref}, P_{gref} 分别为端电压指令值和 DFIG 有功功率指令值; $i_{cd}^p, i_{cq}^p, i_{rd}^p, i_{rq}^p$ 分别为网侧变流器 d 轴电流、网侧变流器 q 轴电流、转子侧变流器 d 轴电流和转子侧变流器 q 轴电流; $u_{cd}^p, u_{cq}^p, u_{rd}^p, u_{rq}^p$ 分别为网侧变流器 d 轴电压、网侧变流器 q 轴电压、转子侧变流器 d 轴电压和转子侧变流器 q 轴电压; R_g, L_g, L_c 分别为电网等效电阻、电网等效电感和网侧变流器滤波电感; $PI_1 \sim PI_7$ 为 7 个参数不同的比例积分控制器; 上标 p 表示该物理量基于 PLL 坐标系进行坐标变换。

文中选用端电压,即定子电压矢量相位为参考

相位,作出如下假设:

(1) 根据文献[20—21]中对 DFIG 小信号建模的思想,不考虑电流环动态,认为 PLL 坐标下定转子电流理想跟踪指令值。

(2) 不考虑电阻损耗,只计及电抗的影响。

(3) 不考虑定转子磁链动态,定义定子反电动势 $E_s = -jX_m I_r$, 其中 X_m 为定转子互感。

基于以上假设,DFIG 转子侧变换器 (rotor side converter, RSC) 可等效为注入电压源,网侧变换器 (grid side converter, GSC) 可等效为注入电流源。DFIG 接入弱交流电网等效电路如图 2 所示。

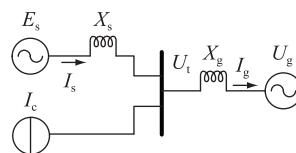


图 2 DFIG 接入弱交流电网等效电路

Fig.2 The equivalent circuit of the DFIG integrated to weak AC grid

根据图 2,可得 DFIG 端电压如式(1)和式(2)所示。

$$U_t = -jX_m I_r - jX_s I_s \quad (1)$$

$$U_t = U_g + jX_g I_g \quad (2)$$

式中: X_g, X_s 分别为电网感抗、定子感抗。

2 连接弱电网的 DFIG 稳定性极限及灵敏度分析

2.1 DFIG 静态稳定性极限分析

2.1 节研究稳态时 DFIG 静态稳定性极限的物理约束。此时,PLL 输出相位与端电压相位相同。根据式(1)、式(2)可得:

$$\begin{cases} u_{ud} = \frac{X_s}{X_g + X_s} U_{gd} + \frac{X_g X_s}{X_g + X_s} i_{cq} + \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} i_{rq} \\ u_{uq} = \frac{X_s}{X_g + X_s} U_{gq} + \frac{X_g X_s}{X_g + X_s} i_{cd} + \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} i_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{ud}, u_{uq} 分别为 d, q 轴端电压; U_{gd}, U_{gq} 分别为 d, q 轴电网电压。

由于 $u_{uq} = 0$, 由式(1)可得:

$$i_{sd} = -\frac{X_m}{X_s} i_{rd} \quad (4)$$

式中: i_{sd} 为 d 轴定子电流。

稳态时 $P_c = P_r = -s_r P_s$, 则:

$$i_{cd} = -s_r i_{sd} \quad (5)$$

式中: s_r 为运行转差。

根据电路原理,DFIG 端电压为:

$$U_t = U_g e^{-j\theta_t} + jX_g (i_{gd} + j i_{gq}) \quad (6)$$

式中: θ_t 为电网电压相位; i_{gd}, i_{gq} 分别为 d, q 轴 DFIG 输出电流。

由式(6)左右侧实部虚部分别相等,可得:

$$\sin \theta_t = \frac{(s_r - 1)X_g X_m}{X_s U_g} i_{rd} \quad (7)$$

$$U_{gd} = U_g \cos \theta_t \quad (8)$$

由于 $u_{vq} = 0, i_{cq} = 0$, 可得端电压为:

$$U_t = \frac{1}{X_g + X_s} \sqrt{(X_s U_g)^2 - (X_g X_m)^2 (s_r - 1)^2 i_{rd}^2 + \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} i_{rq}} \quad (9)$$

输出有功功率 P_e 为:

$$P_e = 1.5(u_{ud}i_{gd} + u_{vq}i_{gq}) = \frac{1.5(s_r - 1)X_m i_{rd}}{(X_g + X_s)X_s} \times [\sqrt{(X_s U_g)^2 - (X_g X_m)^2 (s_r - 1)^2 i_{rd}^2} + X_g X_m i_{rq}] \quad (10)$$

以无穷大电源电压、电网电抗分别作为电压、阻抗基值, 即 $U_g = 1$ p.u., $X_g = 1$ p.u.。设定 $X_s = 4.071$ p.u., $X_m = 3.9$ p.u., $X_r = 4.056$ p.u., $s_r = -0.2$ p.u.。由式(7)可知, $-i_{rd}$ 不大于 0.87 p.u.。结合式(9)、式(10), 可得转子 dq 轴电流与端电压及有功功率的关系曲线见图3。

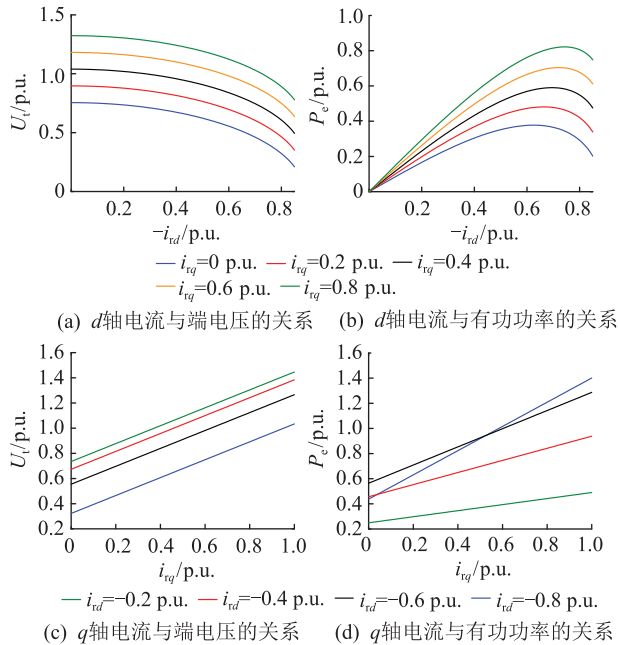


图3 转子侧 dq 轴电流与端电压及有功功率的关系曲线

Fig.3 Rotor dq -axis current vs. terminal voltage and active power

由图3可知, 转子 d 轴电流绝对值 $-i_{rd}$ 的增加导致端电压幅值 U_t 降低, 转子 q 轴电流 i_{rq} 的增加导致端电压幅值 U_t 升高。输出有功功率 P_e 随着 $-i_{rd}$ 的增加先增大后减小, 且不同 i_{rq} 下, 使得 P_e 达到最大值

的 $-i_{rd}$ 不同。这是由于 $-i_{rd}$ 的增加会导致有功功率增加和端电压幅值下降, 当 $-i_{rd}$ 增大到一定值时, 端电压下降的速率大于有功功率增加的速率, 最终导致 $-i_{rd}$ 增加引起有功功率减小。 P_e 随着 i_{rq} 增加线性增加, 且 $-i_{rd}$ 越大时, P_e 随 i_{rq} 增加的速率越快。

由以上分析可知, 有功功率、端电压幅值均和转子 dq 轴电流有关, 且有功功率和端电压为 i_{rd} 的非线性函数。当转子侧变换器运行在 $-\partial P_e / \partial i_{rd} < 0$ 区域且无动态无功支撑时, $-i_{rd}$ 的增加将引起输出有功功率的减小, 进而导致有功功率控制失稳。因此, 在 DFIG 无端电压控制环时, 转子 d 轴电流直接影响了系统稳定性极限, 其超过临界值后会导致系统失稳。

2.2 灵敏度分析

为了进一步研究 P_e, U_t 与 i_{rd}, i_{rq} 的关系特性, 文中对不同工作点下 $\partial U_t / \partial i_{rd}, \partial U_t / \partial i_{rq}, \partial P_e / \partial (-i_{rd}), \partial P_e / \partial i_{rq}$ 特性进一步分析。由式(7)、式(9)可得 θ_{t0}, U_{t0} 与 i_{rd0}, i_{rq0} 间的转换关系式如式(11)和式(12)所示; 下标 0 表示工作点处的变量值。

$$i_{rd0} = \frac{X_s U_g \sin \theta_{t0}}{(s_r - 1) X_g X_m} \quad (11)$$

$$i_{rq0} = \frac{(X_g + X_s) U_{t0} - X_s U_g \cos \theta_{t0}}{X_g X_m} \quad (12)$$

短路比 λ_{SCR} 可表征接入点的电网强度为:

$$\lambda_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_e} = \frac{U_g^2}{X_g P_e} = \frac{U_g}{U_{t0} \sin \theta_{t0}} \quad (13)$$

式中: S_{ac} 为交流系统的短路容量。

λ_{SCR} 大于等于 3 时, 系统为强电网; λ_{SCR} 小于 3 时, 系统为弱电网; λ_{SCR} 小于 2 时, 系统为极弱电网^[22-23]。

将式(7)、式(9)、式(10)线性化, 同时以 θ_{t0}, U_{t0} 替代 i_{d0}, i_{q0} , 可得式(14)一式(16)。

$$\Delta \theta_t = \frac{(s_r - 1) X_g X_m}{X_s U_g \cos \theta_{t0}} \Delta i_{rd} \quad (14)$$

$$\Delta U_t = -\frac{X_g X_m (s_r - 1) \tan \theta_{t0}}{X_g + X_s} \Delta i_{rd} + \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} \Delta i_{rq} \quad (15)$$

$$\Delta P_e =$$

$$\frac{(s_r - 1) X_m U_g \left[\cos^2 \theta_{t0} + \frac{(X_g + X_s) U_{t0}}{X_s U_g} \cos \theta_{t0} - 1 \right]}{(X_g + X_s) \cos \theta_{t0}} \times$$

$$\Delta i_{rd} - \frac{X_m U_g \sin \theta_{t0}}{X_g + X_s} \Delta i_{rq} \quad (16)$$

则 $\partial U_t / \partial i_{rd}, \partial U_t / \partial i_{rq}, \partial P_e / \partial (-i_{rd}), \partial P_e / \partial i_{rq}$ 表达如式(17)一式(20)所示。

$$\left. \frac{\partial U_t}{\partial i_{rd}} \right|_{\theta_{10}, U_{10}} = \frac{X_g X_m (1 - s_r) \tan \theta_{10}}{X_g + X_s} \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial U_t}{\partial i_{rq}} \right|_{\theta_{10}, U_{10}} = \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial (-i_{rd})} \Big|_{\theta_{10}, U_{10}} = \frac{- (s_r - 1) X_m U_g \left[\cos^2 \theta_{10} + \frac{(X_g + X_s) U_{10}}{X_s U_g} \cos \theta_{10} - 1 \right]}{(X_g + X_s) \cos \theta_{10}} \quad (19)$$

$$\left. \frac{\partial P_e}{\partial i_{rq}} \right|_{\theta_{10}, U_{10}} = - \frac{X_m U_g \sin \theta_{10}}{X_g + X_s} \quad (20)$$

由式(17)一式(20)可知, $\partial U_t / \partial i_{rd}$ 正比于 $\tan \theta_{10}$, 当运行功角较大时, 转子 d 轴电流的轻微增加将导致系统端电压的急剧降低; $\partial U_t / \partial i_{rq}$ 为定值, 其值由系统参数决定; $\partial P_e / \partial (-i_{rd})$ 与 s_r, θ_{10}, U_{10} 等相关; $\partial P_e / \partial i_{rq}$ 与 $\sin \theta_{10}$ 成反比。由于 $\partial P_e / \partial (-i_{rd}) < 0$ 时系统失稳, 故定义系数 K 为:

$$K = \frac{\partial P_e}{\partial (-i_{rd})} \Big|_{\theta_{10}, U_{10}} \quad (21)$$

绘制 K 与 θ_{10} 的关系曲线如图 4(a) 所示, K 随 λ_{SCR} 变化的曲线如图 4(b) 所示。

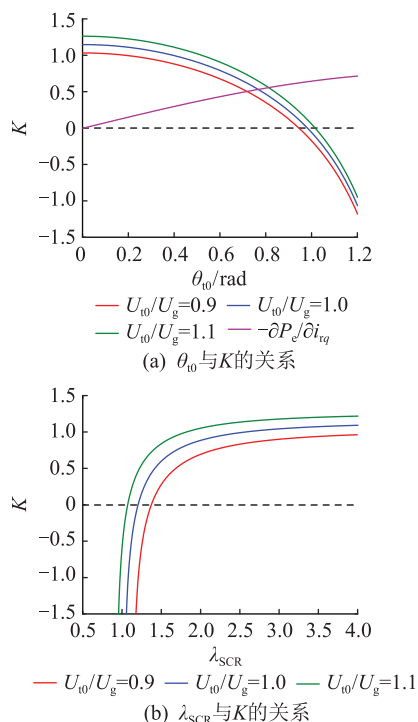


图 4 K 随 θ_{10} 和 λ_{SCR} 变化的曲线

Fig.4 Curves of K as a function of θ_{10} and λ_{SCR}

由图 4(a) 可知, 当 $K=0$ 时, 系统处于临界稳定, 在不同的端电压条件下, 临界稳定状态所对应的功角不同。

定义 $\left. \frac{\partial P_e}{\partial i_{rd}} \right|_{\theta_{10}, U_{10}} = 0$ 时的功角为临界功角, 则临界功角为:

$$\theta_{lim} = \arccos \left(- \frac{(X_g + X_s) U_{10}}{X_s U_g} + \sqrt{\frac{(X_g + X_s) U_{10}^2}{X_s U_g} + 4} \right) \quad (22)$$

临界功角从物理意义上对应着系统的稳定性极限, 当功角小于临界功角时系统稳定, 当功角大于临界功角时系统超出了稳定性极限而失稳。由此可见, U_{10}/U_g 分别为 0.9, 1.0, 1.1 时, 临界功角值分别为 0.94 rad, 0.98 rad, 1.02 rad。因此, 端电压的增加使临界功角增加, 有利于系统稳定性极限的提升。

由图 4(b) 可知, 当 $\lambda_{SCR} < 2$ 时, K 随 λ_{SCR} 的减小急剧减小且变为负, 降低了 DFIG 的稳定性极限。可见, U_{10}/U_g 分别为 0.9, 1.0, 1.1 时, K 为 0 所对应的 λ_{SCR} 分别为 1.37, 1.20, 1.07。因此, 端电压的增加使系统可以运行的最低 λ_{SCR} 降低, 提升了系统稳定性极限。

3 控制环路对 DFIG 稳定性极限的影响

3.1 弱电网下 DFIG 的小信号模型

前文分析基于 PLL 准确跟踪端电压相位的假设, 但实际运行中各控制环路均存在一定响应时间。因此, 3.1 节考虑 PLL、端电压环、有功功率环和直流电压环等控制环路, 建立小信号分析模型, 对系统的稳定性极限进行探究。图 5 为同步 dq 坐标系和 PLL- dq 坐标系之间的联系。

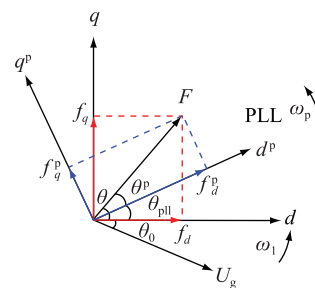


图 5 同步 dq 坐标系和 PLL- dq 坐标系的联系

Fig.5 Spatial relationship between the synchronous dq reference frame and the PLL- dq reference frame

同步 dq 参考系中, 定义稳态时端电压相位 θ_{10} 为 0。 F 为电压、电流等相量; f_d, f_q 为同步 dq 坐标系下相量 F 的 dq 轴分量; f_{pd}, f_{pq} 为 PLL 参考坐标系下相量 F 的 dq 轴分量; ω_p, ω_1 分别为 PLL 参考坐标系转速和同步 dq 坐标系转速。同步 dq 坐标系中的变

量和PLL参考系中的测量值之间的关系为:

$$\theta_{pll} = \theta_p - \omega_1 t \quad (23)$$

$$\begin{cases} f_d = f_d^p \cos \theta_{pll} - f_q^p \sin \theta_{pll} \\ f_q = f_d^p \sin \theta_{pll} + f_q^p \cos \theta_{pll} \end{cases} \quad (24)$$

式中: f 可为 I_s, I_c, I_g, U_t 等相量。将电压与电流线性化,可推导出:

$$\begin{cases} \Delta i_{gd} = -\frac{X_m}{X_g + X_s} \Delta i_{rd} - \frac{X_g}{X_g + X_s} \Delta i_{cd} \\ \Delta i_{gq} = -\frac{X_m}{X_g + X_s} \Delta i_{rq} - \frac{X_g i_{cd0}}{X_g + X_s} \Delta \theta_{pll} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{td} = \frac{X_g X_m}{X_g + X_s} \Delta i_{rq} - \frac{X_s X_g i_{cd0}}{X_g + X_s} \Delta \theta_{pll} \\ \Delta u_{tq} = -\frac{X_g X_m}{X_g + X_s} \Delta i_{rd} + \frac{X_s X_g}{X_g + X_s} \Delta i_{cd} \end{cases} \quad (26)$$

$$\Delta P_e = -K_1 \Delta i_{rd}^p - K_6 \Delta i_{rq}^p + K_5 \Delta i_{cd}^p + K_7 \Delta \theta_{pll} \quad (27)$$

$$\Delta U_t = -K_2 \Delta i_{rq}^p + K_8 \Delta \theta_{pll} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta u_{tq}^p}{U_t} = -K_{13} \Delta i_{rd}^p - K_4 \Delta \theta_{pll} + K_{12} \Delta i_{cd}^p \quad (29)$$

$$\Delta U_{dc} = \frac{1}{CU_{dc0}} (\Delta P_r - \Delta P_c) \frac{1}{s} \quad (30)$$

$$\Delta P_r - \Delta P_c = K_9 \Delta i_{rd}^p + K_{10} \Delta i_{rq}^p - K_3 \Delta i_{cd}^p - K_{11} \Delta \theta_{pll} \quad (31)$$

式中: $K_1 \sim K_{13}$ 为和DFIG运行状态和电网感抗相关的参数; $1/s$ 为积分环节。

根据以上的数学建模,在Matlab/Simulink中搭建DFIG接入弱交流电网的小信号模型和详细的时域仿真模型,DFIG模型的参数如表1所示。

表1 DFIG系统参数

Table 1 Parameters of DFIG system

参数	数值
额定功率/MW	2
额定电压/V	690
额定直流电压/V	1 200
有功功率控制参数 k_{p1}	1.6
有功功率控制参数 k_{i1}	240
端电压控制参数 k_{p2}	2
端电压控制参数 k_{i2}	100
直流电压控制参数 k_{p3}	3
直流电压控制参数 k_{i3}	200
PLL控制参数 k_{p4}	60
PLL控制参数 k_{i4}	1 400

待系统稳定运行后,分别在2个模型中设置相同的小扰动,记录DFIG受到小扰动后的有功功率和直流电压响应波形,如图6所示。可见,DFIG小

信号模型的有功功率和直流电压小干扰响应波形和其详细时域模型的仿真结果基本一致。因此,文中所提DFIG小信号模型可以表现其小扰动动态特性。

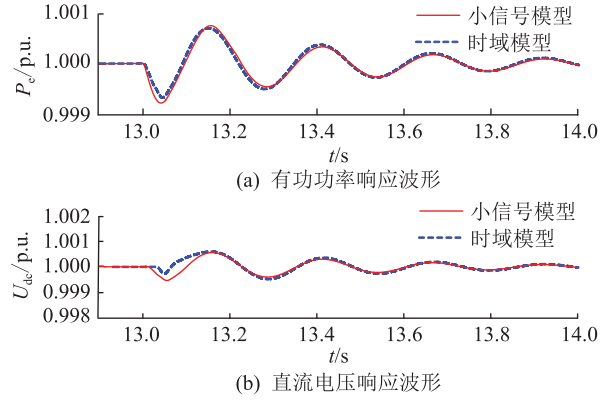


图6 DFIG并网系统小信号模型和时域仿真模型的波形对比

Fig.6 Comparison between small signal model and time-domain model of grid connected DFIG

3.2 DFIG控制环路对稳定性极限的影响

基于提出的小信号模型,结合特征值分析法,对不同电网强度、功角、控制环路带宽下系统的稳定性极限进行分析。首先,分析端电压环带宽对系统稳定性的影响。在不同电网强度下,由2 Hz至60 Hz等阻尼调节端电压带宽,可得主导特征值随端电压控制带宽变化的根轨迹如图7所示。

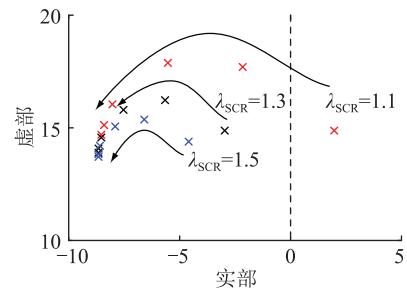


图7 主导特征值随端电压控制带宽变化的根轨迹

Fig.7 The root locus diagram of the dominant eigenvalue varies with the terminal voltage control bandwidth

由图7可知,随端电压环带宽的增加,系统阻尼增大,稳定性极限提升。从不考虑端电压环动态和考虑所有控制环动态2种情况出发,对DFIG稳定性极限进行探究:

(1) 不考虑端电压环动态。没有端电压控制环,用 q 轴电流控制去取代端电压控制,认为在直流电压时间尺度上端电压理想跟踪指令值,仅考虑PLL、有功功率环、直流电压环等3个控制环路的影响;

(2) 考虑所有控制环路的影响。包含端电压控

制环,考虑直流电压时间尺度上所有控制环路的动态特性。

2种情况下,系统根轨迹随电网强度、运行功角、PLL 路带宽变化的根轨迹分别如图 8—图 10 所示。图中 θ 为运行功角; $\lambda_{1,2},\lambda_3$ 为系统特征根。

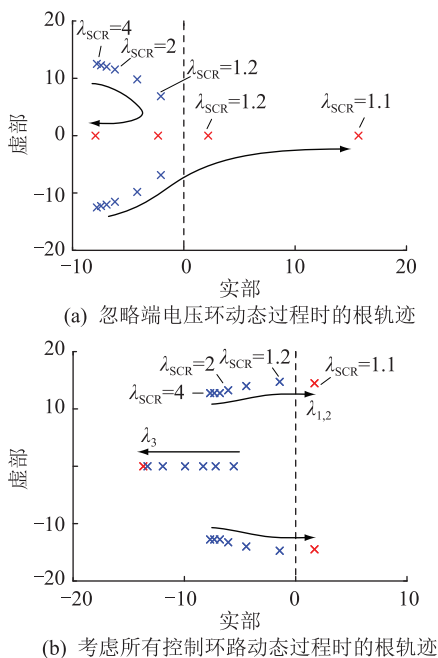


图 8 特征值随电网强度变化的根轨迹
Fig.8 The root locus diagram of the eigenvalue varies with grid strength

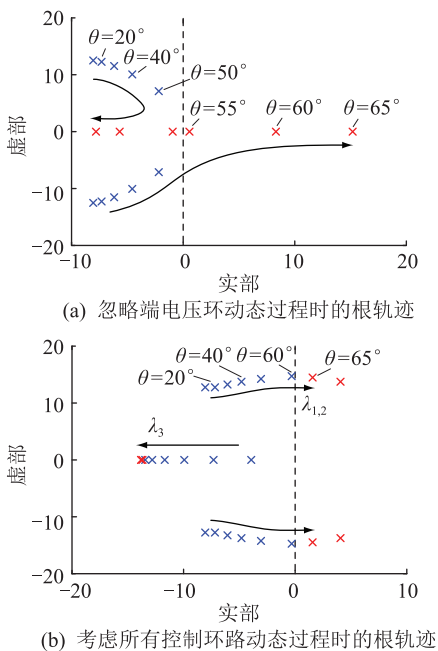


图 9 特征值随功角变化的根轨迹
Fig.9 The root locus diagram of the eigenvalue varies with the power angle

由图 8 和图 9 可知,与考虑所有控制环路的动态过程相比,端电压理想跟踪指令值时,系统的稳

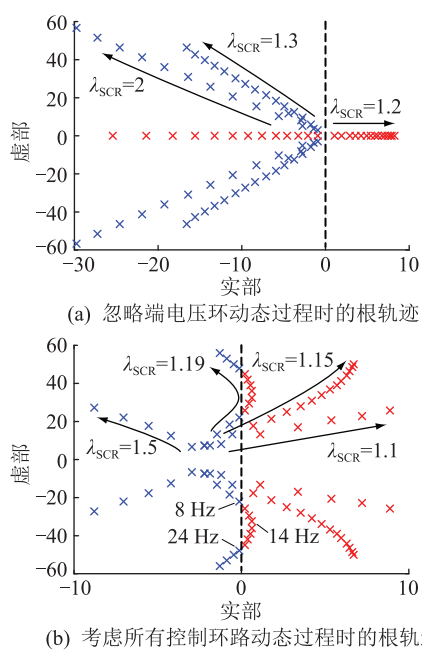


图 10 特征值随 PLL 控制带宽变化的根轨迹
Fig.10 The root locus diagram of the eigenvalue varies with the PLL control bandwidth

定性极限降低。当 λ_{SCR} 为 1.2 时、运行功角为 55° 时,在考虑所有控制环路影响的情况下,系统均处于稳定状态;而在忽略端电压环动态过程的情况下,主导特征根实部不稳定,超出了系统的稳定性极限。不考虑端电压环动态时,系统运行短路比极限约为 1.3,运行功角极限约为 50° 。

图 10 为不同短路比下,PLL 带宽由 2 Hz 等阻尼增大到 30 Hz 时主导特征根根轨迹。可知,忽略端电压环动态时,随着 PLL 带宽的变化,主导特征根根轨迹均为直线;考虑端电压环动态时,端电压环与 PLL 的相互作用在一定程度上抑制了主导特征根向虚轴移动,且 PLL 带宽越大时,抑制作用越强。由图 10(b)可知,在考虑所有控制环路动态过程的情况下,当短路比为 1.19 时,系统运行状态随 PLL 带宽的增大由稳定过渡到不稳定,增大至一定程度后,系统恢复到稳定运行状态,阻尼比先减小后增大,稳定性极限先降低后升高。

由以上分析可知,与不考虑所有控制环路动态过程时的静态稳定性极限相比,考虑所有控制环路动态过程时,系统的稳定性极限提高,且在正常运行范围内等阻尼降低 PLL 带宽或提高端电压控制环带宽可以提高系统的稳定性极限。但端电压理想跟踪指令值时,系统稳定性极限反而降低,且调节 PLL 带宽无法改变系统的稳定性极限。通过进一步分析,对比 DFIG 运行在超同步模式($s < 0$)和亚同步模式($s > 0$),发现不同控制环路对 DFIG 稳定极限影响的变化趋势一致,因此,结论可以通用。

4 仿真结果

采用 3.1 节中建立的详细时域仿真模型,分别观测不同工作点和不同电网强度下 DFIG 的有功功率、端电压幅值以及直流电压幅值的响应波形,对以上理论分析结果进行验证。

图 11 为不同工作点下,DFIG 的小扰动响应波形。运行 DFIG 接入弱电网的模型,待系统稳定后,在 10.5 s 设置触发电网电压小扰动,在不同的工作点,DFIG 有功功率、端电压幅值以及直流电压受到小扰动的响应波形差异较大。并且做了忽略端电压环动态和包含端电压环动态条件下的 2 组对比仿真。由图 11 可知,忽略端电压环的动态过程时,功角运行极限为 50° ;考虑端电压环的动态过程时,功角运行极限为 60° 。因此,端电压环的动态提升了 DFIG 的运行极限。

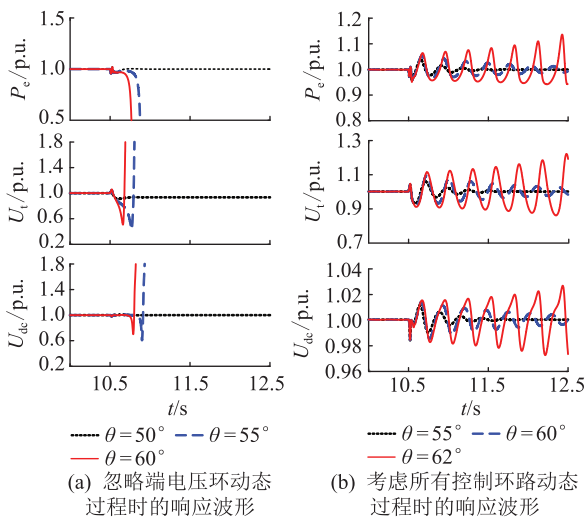


图 11 不同运行功角下的响应波形

Fig.11 Response waveforms under different power angles

图 12 为不同短路比下,DFIG 的功率极限响应波形。运行 DFIG 接入弱电网的模型,待系统稳定后,设置 DFIG 输出有功功率不断增加,直到上升至 1.0 p.u.,在不同的电网强度下,记录 DFIG 有功功率、端电压幅值以及直流电压在此过程中的响应。初始时,通过调节 PLL 带宽使系统能够稳定运行。并且做了忽略端电压环动态和包含端电压环动态条件下的 2 组对比仿真。由图 12 可知,忽略端电压环动态过程的情况下,短路比降低至 1.23,系统运行至有功功率为 1.0 p.u. 仍然稳定;短路比降低至 1.20,系统运行至有功功率为 1.0 p.u. 时失稳,即此条件下系统的稳定性极限在短路比 1.20 至 1.23 之间。包含端电压环动态过程的情况,短路比降低至 1.15,系统运行至有功功率为 1.0 p.u. 时系统稳定;

短路比降低至 1.12,系统运行至有功功率为 1.0 p.u. 时系统失稳,即此条件下系统的稳定性极限在短路比 1.12 至 1.15 之间。可以看出,在时域仿真中,DFIG 的稳定性极限均与前述特征值分析结果一致。

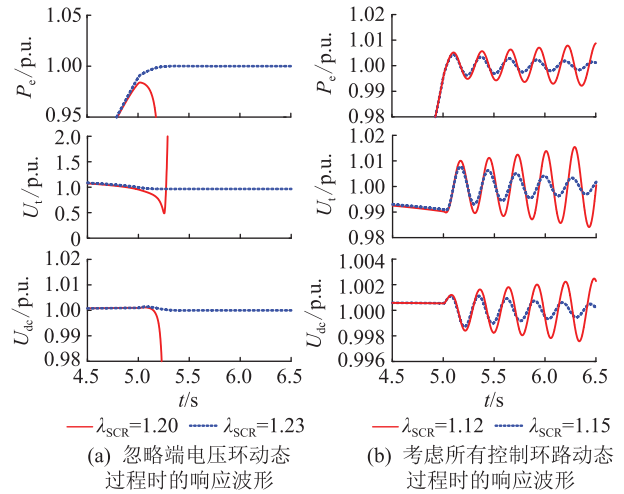


图 12 不同短路比下的响应波形

Fig.12 Response waveforms under different short circuit ratios

5 结论

文中对弱电网下 DFIG 的稳定性极限展开了研究。研究了 DFIG 注入电网的有功功率、端电压与转子 dq 轴电流间的关系以及静态稳定性极限的物理约束;建立了 DFIG 直流电压时间尺度小信号模型,进一步研究了控制环路的动态对 DFIG 稳定性极限的影响,得到主要结论如下:

(1) 运行功角较大时,有功功率对转子 q 轴电流的灵敏度更大。 $\partial P_e / \partial (-i_{rd}) < 0$ 是制约功率控制稳定性的关键因素,在端电压和电网电压幅值均为 1 p.u. 的情况下, $\partial P_e / \partial (-i_{rd}) = 0$ 时的临界功角为 56.15° 。

(2) PLL、有功功率环、直流电压环等控制环路的相互作用,降低了 DFIG 的稳定性极限。在不考虑动态无功支撑时,DFIG 的稳定运行功角限制在 50° 左右。考虑所有控制环路的动态过程时,DFIG 稳定性极限上升,运行功角极限约为 60° 。

(3) 在极弱电网情况下,等阻尼降低 PLL 带宽或提高端电压控制环带宽可以提高 DFIG 稳定性极限。

参考文献:

[1] 王潇,刘辉,邓晓洋,等. 双馈风电场经柔性直流并网系统的宽频带振荡机理分析与风险评估[J]. 全球能源互联网, 2020,3(3):238-247.

WANG Xiao, LIU Hui, DENG Xiaoyang, et al. Mechanism analysis and risk assessment of broadband resonance in doubly-fed

- induction generator-based wind farms integration through flexible HVDC[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(3):238-247.
- [2] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. *高电压技术*, 2016, 42(10):3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(10):3025-3037.
- [3] 邱晓燕,沙熠,宁雪姣,等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. *高电压技术*, 2016, 42(7):2084-2091.
QIU Xiaoyan, SHA Yi, NING Xuejiao, et al. Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(7):2084-2091.
- [4] LI J, LIU C, ZHANG P F, et al. Difference between grid connections of large-scale wind power and conventional synchronous generation[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5):486-493.
- [5] XIE L J, YAO L Z, CHENG F, et al. Coordinate control strategy for stability operation of offshore wind farm integrated with Diode-rectifier HVDC [J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(3):205-216.
- [6] 姜齐荣,王亮,谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. *高电压技术*, 2017, 43(4):1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(4):1057-1066.
- [7] 刘振亚,张启平,董存,等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16):2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16):2513-2522.
- [8] LEE W J, SUL S K. DC-link voltage stabilization for reduced DC-link capacitor inverter[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(1):404-414.
- [9] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2015, 3(4):1193-1204.
- [10] LYU J, DONG P, SHI G, et al. Subsynchronous oscillation of large DFIG-based wind farms integration through MMC-based HVDC[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China. IEEE, 2014:2401-2408.
- [11] AMIN M, MOLINAS M, LYU J. Oscillatory phenomena between wind farms and HVDC systems: the impact of control [C]//2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2015:1-8.
- [12] 薛安成,王清,毕天姝. 双馈风机与同步机小扰动功角相互作用机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2):417-425.
XUE Ancheng, WANG Qing, BI Tianshu. Study on the mechanism of small signal dynamic interaction between doubly-fed induction generator and synchronous generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(2):417-425.
- [13] 刘巨,姚伟,文劲宇. 考虑 PLL 和接入电网强度影响的双馈风机小干扰稳定性分析与控制[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(11):3162-3173, 3371.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu. Small signal stability analysis and control of double-fed induction generator considering influence of PLL and power grid strength[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(11):3162-3173, 3371.
- [14] WANG D, HOU Y H, HU J B. Stability of DC-link voltage control for paralleled DFIG-based wind turbines connected to weak AC grids[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, MA, USA. IEEE, 2016:1-5.
- [15] WANG D, HOU Y H, HU J B. Effect of AC voltage control on the stability of weak AC grid connected DFIG system[C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Xi'an, China. IEEE, 2016:1528-1533.
- [16] ZHOU J Z. Impact of short circuit ratio and phase locked loop parameters on the small-signal behaviour of a VSC-HVDC converter[J]. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016:1.
- [17] 黄云辉,翟雪冰,刘栋,等. 弱电网下风力发电机组并网变流器直流电压稳定性机理分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(9):3127-3136.
HUANG Yunhui, ZHAI Xuebing, LIU Dong, et al. Stability analysis on DC-link voltage of wind turbine grid-connected converter as integrated to weak grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(9):3127-3136.
- [18] 黄云辉,周翩,王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变流器功率控制稳定性[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(14):93-99.
HUANG Yunhui, ZHOU Pian, WANG Longfei. Power control stability in vector control based voltage source converters connected to weak grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(14):93-99.
- [19] HUANG Y H, WANG D. Effect of control-loops interactions on power stability limits of VSC integrated to AC system [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(1):301-310.
- [20] HU J B, YUAN H, YUAN X M. Modeling of DFIG-based WTs for small-signal stability analysis in DVC timescale in power electronized power systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3):1151-1165.
- [21] HU J B, HUANG Y H, WANG D, et al. Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(4):1325-1336.
- [22] 吴广禄,周孝信,李亚楼,等. 弱交流电网条件下 VSC-HVDC 改进矢量控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017,

37(16):4577-4590,4882.

WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, LI Yalou, et al. Improved vector control for VSC-HVDC connected to weak AC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16):4577-4590,4882.

[23] 朱当, 黄云辉, 陈后全, 等. 弱电网下双馈风机多机系统直流电压控制时间尺度的建模与稳定性分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(4):21-29.

ZHU Dang, HUANG Yunhui, CHEN Houquan, et al. Modeling and stability analysis of DC voltage control timescale in DFIG multi-machine system under weak power grid[J]. Smart Power, 2021, 49(4):21-29.

作者简介:



黄云辉

黄云辉(1986),男,博士,副教授,研究方向为电力电子化电力系统、风力发电系统并网控制与稳定运行(E-mail:yellowcloudfly@163.com);

王凌云(1997),男,硕士在读,研究方向为风力发电系统并网控制与稳定运行;

喻恒凝(1997),女,硕士在读,研究方向为风力发电系统稳定性分析、新能源电力系统。

Stability limit of double-fed induction generator system connected to weak grid

HUANG Yunhui¹, WANG Lingyun¹, YU Hengning¹, WANG Dong¹, ZHU Guorong¹, HUANG Yunhong²

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Bailianhe Pumped Storage Co., Ltd., Huanggang 438000, China)

Abstract: With large-scale wind turbines connected to the power system, the power grid strength becomes weak, leading to unstability problem of wind turbines in DC voltage control timescale. The stability limit of double-fed induction generator (DFIG) system connected to weak AC grid is studied in this paper. Firstly, the relationship between the active power and terminal voltage of DFIG injected into the power grid and the current of the dq axes of the rotor as well as the physical constraints of the stability limit are studied, and the sensitivity is analyzed. The sensitivity of active power to rotor d -axis current is summarized. Then, a small-signal model of DFIG connected to weak grid is built. Through the eigenvalue analysis, the influence of the dynamic behavior of the control loop of DFIG on its stability limit is studied. The results show that the stability limit can be increased by decreasing the bandwidth of the phase locked loop (PLL) or increasing the bandwidth of the terminal voltage control loop with equal damping in the normal operating range, when the dynamic process of all control loops is considered. Without considering the dynamic reactive power support, the power angle of DFIG is limited to about 50° . Considering the dynamic process of all control loops, the limit of the power angle of DFIG is about 60° .

Keywords: weak grid; double-fed induction generator (DFIG); stability limit; terminal voltage control; phase locked control; eigenvalue analysis

(编辑 李栋)