低电压穿越期间双馈风电机组稳定性分析与电流分配方法

徐海亮,李 志,王中行

(中国石油大学(华东)新能源学院,山东 青岛 266580)

摘要:在弱电网情况下,双馈风电机组(DFIG)与电网阻抗之间会发生复杂的交互作用,若在低电压穿越期间 有功、无功电流设置不当,则系统将面临失稳风险。为此,建立DFIG的小信号导纳模型,分析系统失稳机理, 尤其是厘清输电线路阻抗、锁相环等因素对稳定性的影响规律。提出满足无功电流响应准则、变换器容量限 制和系统稳定性约束的DFIG有功、无功电流分配原则,推导DFIG稳定运行范围,从而为弱电网下DFIG的电 流指令设置提供参考。实验结果表明:有功、无功电流对稳定性的影响规律不同,与无功电流相比,有功电流 对稳定性的影响更为显著,验证了理论分析的正确性,且进一步验证了所提电流分配方法的有效性。 关键词:双馈风电机组;弱电网;低电压穿越;稳定性;电流指令

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206020

0 引言

随着风电装机规模的不断攀升,电网导则对并 网风电机组提出了日益严苛的运行要求,特别是要 求风电机组在电网电压跌落期间(持续时间为数毫 秒至数秒)不仅不能脱网,还要向电网注入一定的无 功、有功电流,以支撑电网电压恢复和系统频率稳 定^[13]。目前主流并网导则对风电机组低电压穿越 LVRT(Low Voltage Ride-Through)期间的电流响应 强调"无功优先",且有清晰的定量要求,而对于有功 则默认为"能发尽发",且无定量要求。因此,对于 LVRT期间风电机组无功、有功电流的分配方法,值 得进行深入研究。

双馈风电机组 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)由于具有励磁变流器容量小、成本低、运行效率高等优点,目前已成为陆上风电的主流机型^[46]。然而,由于定子绕组与电网直接相接,DFIG 对电网扰动较为敏感^[7],特别是在计及长距离传输线之后,电网强度变弱,DFIG运行面临的不确定性增加^[8]。已有研究表明,电网高阻抗可能会导致系统稳定性下降,甚至导致系统失稳^[8-10]。需指出的是,DFIG在LVRT期间保持稳定是其满足并网导则对无功、有功电流响应要求的前提和基础。弱电网下对DFIG的稳定性要求是DFIG电流指令分配的重要约束之一,该情况下的DFIG稳定性亟待进行深入研究。

状态空间法^[11-14]和阻抗法^[15-18]是分析交互系统 稳定性的常用方法。状态空间法通常需要推导系统

收稿日期:2021-10-07;修回日期:2022-01-19 在线出版日期:2022-06-24 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077222) Project supported by the National Natural Science F

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077222)

的状态空间方程,并采用李雅普诺夫稳定性分析方 法分析系统的稳定性。文献[11-12]基于同步电机 功角和小干扰稳定性理论,建立DFIG的小干扰状态 空间模型,分析锁相环PLL(Phase Locked Loop)参 数对系统稳定性的影响。然而,这些研究在建模过 程中忽略了扰动类型和变流器控制参数对系统稳定 性的影响。文献[13]建立并简化包含转子侧变流器 RSC(Rotor Side Converter)的DFIG小信号模型,进 一步讨论RSC控制参数对稳定性的影响。文献[14] 建立用于研究弱电网情况下 DFIG 稳定性的状态空 间模型,模态分析表明系统的稳定性主要受锁相环、 RSC电流环参数以及机端电压的影响。然而,状态 空间法在应用于DFIG系统这类复杂系统时,存在建 模复杂、模型阶数高、对系统参数依赖性高等不 足[14-16]。阻抗法对系统内部参数的依赖性相对较 低,其计算量相对较小,应用前景广阔。文献[15-16] 建立包含 RSC 的 DFIG 阻抗模型,研究 DFIG 系统 与弱电网之间的交互作用。文献[17-18]提出包含 网侧变流器GSC(Grid Side Converter)的DFIG系统 统一阻抗模型,分析电网电压扰动到控制器输出的 传递关系。

文献[19]提出一种应用等效电阻分析 DFIG 效应危险区域的方法,分析结果表明,DFIG 效应危险区域在系统自然谐振频率对应转速的右侧区域附近。文献[20]提出一种通过扩展系统的受控运行范围来增强 DFIG LVRT能力的控制策略。文献[21] 以最大限度提高机组无功出力极限作为控制目标,推导出分散式风电机组向电网输送的无功功率最大值与风速、发电机转速间的关系,得到能使机组无功出力达到最大的发电机转速指令值。文献[22]通过详细分析等值 DFIG 风电场 GSC 与 RSC 的输出负序电流能力,得到基于不同电网电压不平衡度和系统有功出力的 DFIG 风电场可控运行区域。尽管针对

弱电网情况下 DFIG 的稳定性问题和 LVRT 问题已 有不少研究,但这些研究主要集中在 DFIG 系统控制 参数对稳定性的影响分析^[14-18]、LVRT 能力提升^[19-23] 等方面。而弱电网电压跌落情况下,计及电网导则 对无功、有功电流响应要求后,系统运行点变化对 DFIG 稳定性的影响却鲜有文献报道。

本文聚焦在DFIG LVRT期间,无功、有功电流 响应下的系统稳定性问题。通过建立DFIG系统的 小信号导纳模型,采用广义奈奎斯特稳定性判据分 析有功、无功电流指令变化对DFIG系统稳定性的影 响规律。特别地,本文综合考虑系统稳定性约束、电 网导则约束、DFIG变流器容量约束,提出弱电网下 DFIG有功、无功电流的分配原则,推导出DFIG的 电流指令区间,为弱电网下DFIG的电流指令设置 提供参考。最后,通过实验验证了理论分析的正 确性。

1 DFIG的小信号导纳模型

图1为DFIG并网系统,其中考虑了远距离输电 线路的高阻抗特性,DFIG 变流器控制采用电动机惯 例和传统矢量控制策略。图中:U、I分别为电压和 电流向量,下标"g"、"s"、"r"分别表示网侧、定子和转 子变量,下标"abc"表示三相静止坐标系下的变量, 下标"dq"表示同步旋转坐标系下的变量,下标" $\alpha\beta$ " 表示两相旋转坐标系下的变量;Ueabc为三相电网电 压; U_{cde} 为dq坐标系下的GSC交流侧电压; V_{de} 为直流 母线电压; ω_{x} , θ_{z} 分别为转子磁场电角速度和角度; ω_{nl} 、 θ_{nl} 分别为锁相环输出的电角速度和角度; ω_{sln} 、 θ_{slip} 分别为转差电角速度和角度; R_{line} 、 L_{line} 分别为输电 线路的电阻和电感;R、L分别为转子的电阻和电感; L_m为定转子间的互感;R_x、L_a分别为网侧电抗器的电 阻和电感;PCC表示并网点;PI表示比例-积分;SVM 表示支持向量机。为研究 DFIG 系统的稳定性, 需建 立dq坐标系下的小信号导纳模型。相关建模方法 参考文献[14-17],这里仅给出关键的建模步骤。

1.1 RSC导纳模型

1)主电路模型。

根据 DFIG 在 dq 坐标系下的定、转子电压方程 和磁链方程,可以得到转子电流小信号与转子电压、 定子电流小信号之间的关系为:

$$\hat{I}_{rd}^{\rm b} = \boldsymbol{G}_{\rm rr} \begin{bmatrix} \hat{U}_{rd}^{\rm b} \\ \hat{U}_{rd}^{\rm b} \end{bmatrix} + \boldsymbol{G}_{\rm sr} \begin{bmatrix} \hat{U}_{sd}^{\rm b} \\ \hat{U}_{sq}^{\rm b} \end{bmatrix}$$
(1)

式中:U、I分别为电压和电流,上标"~"表示相应变量 的小信号,下标"d"、"q"分别表示相应变量在 dq 坐 标系下的 d 轴和 q 轴分量;上标"b"表示相应变量以 电网 dq 坐标系为参考坐标系;G_n、G_{sr}分别为从转子 电压小信号、定子电压小信号到转子电流小信号的 传递函数,其表达式如式(2)所示。

$$G_{rr} = \frac{1}{a^{2} + b^{2}} \begin{bmatrix} a & b \\ -b & a \end{bmatrix}$$

$$G_{sr} = \frac{1}{a^{2} + b^{2}} \begin{bmatrix} bd - ac & -(ad + bc) \\ ad + bc & bd - ac \end{bmatrix}$$

$$a = K_{1}L_{m} (\omega_{slip}\omega_{s}L_{m}R_{s} - sK_{s}) + (R_{r} + sL_{r})$$

$$b = -K_{1}L_{m} (s\omega_{s}L_{m}R_{s} + \omega_{slip}K_{s}) + \omega_{slip}L_{r}$$

$$c = sK_{1}L_{m} (R_{s} + sL_{s}) + K_{1}L_{m}\omega_{slip}\omega_{s}L_{s}$$

$$d = -K_{1}L_{m}\omega_{slip} (R_{s} + sL_{s}) + sK_{1}L_{m}\omega_{s}L_{s}$$

$$K_{1} = 1/[(R_{s} + sL_{s})^{2} + \omega_{s}^{2}L_{s}^{2}]$$

$$K_{s} = sL_{m} (R_{s} + sL_{s}) + \omega_{s}^{2}L_{s}L_{m}$$
(2)

式中: ω_s 为定子磁场电角速度; R_s 、 L_s 分别为定子的电阻和电感。

同理,可以得到定子电流小信号与定子电压小 信号、转子电流小信号之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{sd}^{b} \\ \hat{I}_{sg}^{b} \end{bmatrix} = \boldsymbol{G}_{ss} \begin{bmatrix} \hat{U}_{sd}^{b} \\ \hat{U}_{sg}^{b} \end{bmatrix} + \boldsymbol{G}_{rs} \begin{bmatrix} \hat{I}_{rd}^{b} \\ \hat{I}_{rg}^{b} \end{bmatrix}$$
(3)

式中: G_{ss}、G_{ss}分别为从定子电压小信号、转子电流小 信号到定子电流小信号的传递函数,其表达式如式 (4)所示。

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_{ss} = K_1 \begin{bmatrix} R_s + sL_s & \boldsymbol{\omega}_s L_s \\ -\boldsymbol{\omega}_s L_s & R_s + sL_s \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{rs} = K_1 \begin{bmatrix} -K_s & \boldsymbol{\omega}_s L_m R_s \\ -\boldsymbol{\omega}_s L_m R_s & -K_s \end{bmatrix} \end{cases}$$
(4)

根据式(1)—(4),DFIG主电路的开环导纳模型 如附录A图A1所示。

2)RSC电流环模型。

RSC电流环控制拓扑如图1中控制结构部分左 边虚线框所示,采用比例-积分控制器,输入为转子 电流d、q轴指令值,输出为转子电压d、q轴给定。对 RSC电流环进行小信号线性化,可以得到:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{U}_{rd}^{c} \\ \hat{U}_{rq}^{c} \end{bmatrix} = (G_{d1} - G_{rec}) \begin{bmatrix} \hat{I}_{rd}^{c} \\ \hat{I}_{rq}^{c} \end{bmatrix} + G_{d2} \begin{bmatrix} \hat{I}_{sd}^{c} \\ \hat{I}_{sq}^{c} \end{bmatrix} \\ G_{rec} = \begin{bmatrix} K_{p_rec} + K_{i_rec}/s & 0 \\ 0 & K_{p_rec} + K_{i_rec}/s \end{bmatrix} \\ G_{d1} = \begin{bmatrix} R_{r} & -\omega_{slip}L_{r} \\ \omega_{slip}L_{r} & R_{r} \end{bmatrix} \\ G_{d2} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{slip}L_{m} \\ \omega_{slip}L_{m} & 0 \end{bmatrix} \end{cases}$$
(5)

式中:K_{p_rec}、K_{i_rec}分别为RSC电流环比例-积分控制器的比例系数和积分系数;上标"c"表示相应变量以锁相环 dq坐标系为参考坐标系。

3)锁相环模型。

图 1 所示 DFIG 传统矢量控制策略中,锁相环 (拓扑如附录 A 图 A2 所示)被广泛用于获取电网电



图1 DFIG并网系统

Fig.1 Grid-connected system of DFIG

压的频率和相位,以对定、转子的电压、电流等进行 坐标变换。根据图A2,可以推导出锁相环的小信号 传递函数,即:

200

$$\hat{\theta}_{\rm pll} = G_{\rm pll} \hat{U}_{\rm sq}^{\rm b} \tag{6}$$

式中:
$$G_{\text{pll}} = \frac{sK_{\text{p-pll}} + K_{i_\text{pll}}}{s^2 + U_{sd}^{\text{b}} \left(sK_{\text{p-pll}} + K_{i_\text{pll}} \right)}, K_{\text{p-pll}}, K_{i_\text{pll}}$$
分别为锁

相环比例-积分控制器的比例系数和积分系数。

锁相环对稳定性的影响主要表现为并网点电压的扰动会引起锁相环的锁相误差,该误差会通过坐标变换传递至系统各个变量。考虑到锁相环的影响,本文引入锁相环 dq 坐标系(d^eq^e)和电网 dq 坐标系(d^bq^b)这2个坐标系,瞬态情况下两者之间存在角度为δ的锁相偏差,如图2所示。对坐标变换环节进行线性化,可以得到进行坐标变换的变量 F 在 2 个坐标系下的关系为:

$$\begin{cases} \hat{F}_{d}^{c} = \hat{F}_{d}^{b} + F_{q}^{b} \hat{\delta} \\ \hat{F}_{q}^{c} = \hat{F}_{q}^{b} - F_{d}^{b} \hat{\delta} \end{cases}$$
(7)



图2 锁相环 dq 坐标系与电网 dq 坐标系

Fig.2 PLL *dq* coordinate system and power grid *dq* coordinate system

根据图2,在锁相环dq坐标系和电网dq坐标系

下定子电流的关系可表示为:

$$\hat{\boldsymbol{I}}_{s}^{c} = \hat{\boldsymbol{I}}_{s}^{b} + \boldsymbol{G}_{pll}^{is} \hat{\boldsymbol{U}}_{s}^{b}$$

$$(8)$$

式中: G_{pll}^{is} 为定子电流在坐标变换时引入的扰动传递 函数(简称定子电流扰动传函), $G_{pll}^{is} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} I_{sq}^{b} \\ 0 & -G_{sql} I_{sq}^{b} \end{bmatrix}$ 。

同理,可以得到定子电压扰动传递函数 $G_{pll}^{us} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} U_{sq}^{b} \\ 0 & -G_{pll} U_{sd}^{b} \end{bmatrix}$,转子电流和转子电压扰动传递 函数 $G_{pll}^{us} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} I_{rq}^{b} \\ 0 & -G_{pll} I_{rd}^{b} \end{bmatrix}$, $G_{pll}^{us} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} U_{rq}^{b} \\ 0 & -G_{pll} U_{rd}^{b} \end{bmatrix}$, 网侧电流和 网侧电压扰动传递函数 $G_{pll}^{ig} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} I_{gq}^{b} \\ 0 & -G_{pll} I_{gd}^{b} \end{bmatrix}$, $G_{pll}^{uc} \approx G_{pll}^{ug} = \begin{bmatrix} 0 & G_{pll} I_{gq}^{b} \\ 0 & -G_{pll} I_{gd}^{b} \end{bmatrix}$

综上,计及DFIG 主电路、转子电流控制环和锁 相环的小信号导纳框图如附录A图A3所示,其传递 函数模型可表示为:

$$\begin{cases} \hat{I}_{s}^{h} = \left(E - G_{rs} G_{3} G_{rr} G_{d2} \right)^{-1} G_{4} \hat{U}_{s}^{h} \\ G_{1} = G_{d1} - G_{rcc} \\ G_{2} = G_{1} G_{pll}^{ir} + G_{d2} G_{pll}^{is} - G_{pll}^{ur} \\ G_{3} = \left(E - G_{rr} G_{1} \right)^{-1} \\ G_{4} = G_{rs} G_{3} \left(G_{rr} G_{2} + G_{sr} \right) + G_{ss} \end{cases}$$

$$: E \, \mathfrak{H} \stackrel{\text{div}}{=} \tilde{U} \stackrel{\text{in}}{=} \Sigma_{s}$$

式中:E为单位矩阵

DFIG的GSC主要用于维持直流母线电压稳定, 其主电路的小信号导纳模型为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{I}_{gd}^{b} \\ \hat{I}_{gg}^{b} \end{bmatrix} = \boldsymbol{G}_{gg} \begin{bmatrix} \hat{U}_{gd}^{b} \\ \hat{U}_{gg}^{b} \end{bmatrix} + \boldsymbol{G}_{cg} \begin{bmatrix} \hat{U}_{cd}^{b} \\ \hat{U}_{cq}^{b} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{gg} = \begin{bmatrix} R_{g} + sL_{g} & -\boldsymbol{\omega}_{s}L_{g} \\ \boldsymbol{\omega}_{s}L_{g} & R_{g} + sL_{g} \end{bmatrix}^{-1} \\ \boldsymbol{G}_{cg} = -\boldsymbol{G}_{gg} \end{cases}$$
(10)

2) 网侧电流环模型。

DFIG的GSC控制结构如图1中控制结构部分 右边虚线框所示,也采用比例-积分控制器,输入为 网侧电流*d*、*q*轴指令值,输出为网侧电压*d*、*q*轴给 定,对GSC电流环进行小扰动处理,可得:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{U}_{cd}^{c} \\ \hat{U}_{cq}^{c} \end{bmatrix} = \left(\boldsymbol{G}_{g1} - \boldsymbol{G}_{gcc} \right) \begin{bmatrix} \hat{I}_{gd}^{c} \\ \hat{I}_{gq}^{c} \end{bmatrix} + \boldsymbol{G}_{g2} \begin{bmatrix} \hat{U}_{gd}^{c} \\ \hat{U}_{gd}^{c} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{gcc} = -\begin{bmatrix} K_{p_gcc} + K_{i_gcc}/s & 0 \\ 0 & K_{p_gcc} + K_{i_gcc}/s \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{g2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{g1} = \begin{bmatrix} -R_{g} & \boldsymbol{\omega}_{s} L_{g} \\ -\boldsymbol{\omega}_{s} L_{g} & -R_{g} \end{bmatrix} \end{cases}$$
(11)

式中: $K_{p,gec}$ 、 $K_{i,gec}$ 分别为GSC电流环比例-积分控制器的比例系数和积分系数。

与RSC导纳模型类似,综合式(7)、(10)、(11), DFIG的GSC导纳模型如附录A图A4所示,其传递 函数可表示为:

$$\begin{cases} \hat{I}_{g}^{h} = \underbrace{\boldsymbol{G}_{13} \Big[\boldsymbol{G}_{cg} \big(\boldsymbol{G}_{11} + \boldsymbol{G}_{12} \big) + \boldsymbol{G}_{gg} \Big] \hat{\boldsymbol{U}}_{g}^{h}}_{\boldsymbol{Y}_{GSC}} \\ \boldsymbol{G}_{11} = \Big(\boldsymbol{G}_{g1} - \boldsymbol{G}_{gcc} \Big) \boldsymbol{G}_{pll}^{ig} \\ \boldsymbol{G}_{12} = -\boldsymbol{G}_{pll}^{uc} + \boldsymbol{G}_{g2} \Big(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{G}_{pll}^{ug} \Big) \\ \boldsymbol{G}_{13} = \Big[\boldsymbol{E} - \boldsymbol{G}_{cg} \Big(\boldsymbol{G}_{g1} - \boldsymbol{G}_{gcc} \Big) \Big]^{-1} \\ \boldsymbol{G}_{pll}^{uc} \approx \boldsymbol{G}_{pll}^{ug} \end{cases}$$
(12)

1.3 DFIG 完整的导纳模型

已有研究表明,直流母线电压时间尺度较长,在 小信号建模过程中可以忽略直流母线电压的波动。 此时,DFIG的等效导纳可以表示为转子侧和网侧导 纳并联的形式,如图3所示,图中: $Y_{\rm nsc}$ 为RSC侧输出 导纳; $Y_{\rm csc}$ 为GSC侧输出导纳; $\hat{I}_{\rm t}^{\rm b}$ 为DFIG并网点电压 $I_{\rm t}^{\rm b}$ 的扰动分量。据此有:

$$\begin{cases} \boldsymbol{Y}_{\text{DFIG}} = \boldsymbol{Y}_{\text{RSC}} + \boldsymbol{Y}_{\text{GSC}} \\ \boldsymbol{Y}_{\text{RSC}} = \left(\boldsymbol{E} - \boldsymbol{G}_{\text{rs}} \boldsymbol{G}_{3} \boldsymbol{G}_{\text{rr}} \boldsymbol{G}_{d2}\right)^{-1} \boldsymbol{G}_{4} \\ \boldsymbol{Y}_{\text{GSC}} = \boldsymbol{G}_{13} \left[\boldsymbol{G}_{\text{cg}} \left(\boldsymbol{G}_{11} + \boldsymbol{G}_{12} \right) + \boldsymbol{G}_{\text{gg}} \right] \end{cases}$$
(13)

式中: Y_{DFIG} 为 DFIG 系统整体输出导纳; G_{eg} 为 GSC 电 压给定对网侧电流影响的传递函数矩阵; G_{eg} 为并网 点电压对网侧电流影响的传递函数矩阵; G_{11} 、 G_{12} 、 G_{13} 为中间变量矩阵。

1

$$\hat{U}_{g}^{b} \longrightarrow \overline{Y_{RSC}}^{\hat{I}_{s}^{b}} \otimes \widehat{I}_{t}^{b} \\
\downarrow \overline{Y_{GSC}}^{+} \widehat{I}_{g}^{b}$$

需指出的是,由于锁相环等非对称因素的存在, 式(13)中DFIG系统的*d*轴和*q*轴并不对称,这导致 机端电压到机端电流的导纳将呈现为2×2阶的矩 阵,可描述为:

$$\boldsymbol{Y}_{\rm DFIG} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{dd} & \boldsymbol{Y}_{qd} \\ \boldsymbol{Y}_{dq} & \boldsymbol{Y}_{qq} \end{bmatrix}$$
(14)

式中: Y_{dd} 、 Y_{qd} 、 Y_{qq} 、 Y_{qq} 分别为dd、qd、dq、qq通道的导纳。

为了检验式(14)所示 DFIG 导纳模型的正确性, 采用频率扫描法对其进行验证,结果如图4所示。 通过对比可知,频率扫描结果与建模结果较为吻合, 验证了所建模型的正确性。







2 DFIG 稳定性分析

如式(14)所示, dq坐标系下 DFIG 系统表现为多 输入多输出系统, 此时针对单输入单输出系统的稳 定性判据将不再适用。广义奈奎斯特判据是针对多 输入多输出系统而设计的, 通过判断回路矩阵 $L(s)=Z_g(s)Y_{DFIG}(s)$ 的广义奈奎斯特曲线是否环绕 (-1,0)点来判断系统的稳定性^[15]。若L(s)不环绕 (-1,0)点,则系统稳定;反之,则系统不稳定。其中 $Z_g(s)$ 为dq坐标系下的弱电网阻抗,其定义为:

$$Z_{g}(s) = \begin{bmatrix} R_{\text{line}} + sL_{\text{line}} & -\omega_{g}L_{\text{line}} \\ \omega_{g}L_{\text{line}} & R_{\text{line}} + sL_{\text{line}} \end{bmatrix}$$
(15)

式中:ω。为电网角频率。

202

基于所建立的DFIG小信号导纳模型,可以分析 电网故障存续期间有功电流和无功电流注入对并网 系统稳定性的影响机理。

如图1中DFIG主电路拓扑所示,DFIG流入电网的电流主要分为定子电流(由RSC控制)和网侧电流(由GSC控制)两部分。需说明的是:GSC传递转差功率,相对容量较小;根据式(9)、(12)、(13)获得的DFIG导纳伯德图,即附录A图A5可知,DFIG定子侧伯德图与DFIG完整导纳伯德图高度吻合,这表明DFIG系统的输出特性主要由定子侧输出导纳主导。因此,本文着重分析DFIG定子侧输出有功电流和无功电流对系统稳定性的影响,DFIG参数如附录A表A1所示。

2.1 有功电流注入对稳定性的影响

为了研究LVRT期间有功电流注入对系统稳定性的影响,以电网电压跌落至0.5 p.u.为例,通过改变RSC的有功电流指令,观察特征根轨迹的变化。

附录A图A6为向电网注入不同有功电流时系统的特征根轨迹。图A6(a)为向电网注入有功电流0.5 p.u.、无功电流0.45 p.u.时的情况,2条特征根轨迹均没有环绕(-1,0)点,说明此时系统是稳定的。图A6(b)、(c)中向电网注入的有功电流分别增至0.67 p.u.和0.8 p.u.,并保持无功电流不变,特征根轨迹逐渐包围(-1,0)点,表明系数失稳。由此表明,电压跌落情况下,增大有功电流注入不利于系统稳定,甚至会导致系统失稳。

值得注意的是,本文DFIG的控制采用电动机惯例,因此,当DFIG向电网输送有功功率时,机端电流 d轴分量为负值,同理,当DFIG向电网提供无功功 率支撑时,机端电流q轴分量为正值。

2.2 无功电流注入对稳定性的影响

为了研究LVRT期间无功电流注入对系统稳定性的影响,同样以电网电压跌落至0.5 p.u.为例,改变RSC的无功电流指令,刻画广义奈奎斯特曲线,如附录A图A7所示。图A7(a)—(c)中向电网注入的无功电流分别为0.3、0.6、0.9 p.u.,有功电流保持0.2 p.u.不变,2条特征根轨迹均没有环绕(-1,0)点,这表明此时系统是稳定的。分析图A7可知,无功电流的变化基本不改变特征根轨迹,这说明无功电流对系统稳定性的影响较小。

2.3 致稳性机理分析

弱电网的高阻抗(低短路比)形态是导致并网变换器设备失稳的根源^[1-5]。DFIG并网发电时,并网电流经弱电网阻抗会导致定子端电压降落,对DFIG进行小信号线性化后的定子端电压扰动方程为:

$$\begin{cases} \hat{U}_{sd}^{b} = \hat{U}_{gd} + \omega_{s}L_{g}\hat{I}_{sq}^{b} + L_{g}I_{sq}^{b}\hat{\omega}_{s} - R_{g}\hat{I}_{sd}^{b} \\ \hat{U}_{sq}^{b} = \hat{U}_{gq} - \omega_{s}L_{g}\hat{I}_{sd}^{b} - L_{g}I_{sd}^{b}\hat{\omega}_{s} - R_{g}\hat{I}_{sq}^{b} \end{cases}$$
(16)

弱电网电抗 $\omega_s L_g$ 通常远大于电阻 R_g ,因此式 (16)等号右边第四项由弱电网电阻造成的定子电压 扰动可以忽略。有功电流 I_{sd}^b 主要影响定子端电压q 轴分量,无功电流 I_{sq}^b 主要影响定子端电压d轴分量。

根据式(1)、(3)、(5)一(7)、(16)得到的DFIG与 弱电网间的小信号作用机理如图5所示。由图可 知:有功电流扰动会因弱电网阻抗引发定子端电压q 轴扰动,并经锁相环、坐标变换等环节传递到整个控 制系统,从而进一步加剧并网电流扰动,形成恶性循 环,造成系统失稳风险,且电网电抗越大,失稳风险 越高;而无功电流扰动虽然会因弱电网阻抗引发定 子端电压d轴扰动,但该扰动很难进一步传递至控 制系统。因此,有功电流对DFIG稳定性有显著影 响,而无功电流则几乎没有影响。值得注意的是,根 据式(16),当电网电阻增大时,无功电流对稳定性的 影响会有一定程度的增加,但相对于有功电流的影 响而言,其影响程度仍较小。



图5 DFIG与弱电网间小信号作用机理

Fig.5 Small signal interaction mechanism between DFIG and weak grid

综上,电网电压跌落期间向电网注入有功电流 会显著影响DFIG系统的稳定性。电网电压跌落期 间DFIG有功电流和无功电流指令需要在确保系统 稳定的前提下,进一步结合电网导则约束、DFIG变 流器容量约束等因素进行综合评估与设定。

3 DFIG 电流指令分配方法

3.1 DFIG的电流约束条件

分析有功和无功电流指令分配时,本文综合考虑3个重要约束条件,即系统稳定性约束、电网导则约束、DFIG变流器容量约束。

1)稳定性约束。前文的稳定性分析结果表明, LVRT期间DFIG系统的稳定性受DFIG发出电流的 大小和性质的影响。保证系统稳定性是讨论电流分 配和实现无功支撑的前提,因此在电流分配时,应充 分考虑系统稳定性约束。

2)电网导则约束。关于电网导则约束,以我国 GB/T 19963.1-2021《风电场接入电力系统技术 规定 第1部分:陆上风电》为例,其基本要求^[3]如下。

当并网点电压正序分量低于标称电压的80% 时,风电场应能够通过向电力系统注入动态无功电 流支撑电压恢复。风电场动态无功电流增量应响应 并网点电压变化,并应满足:

 $\Delta I_{T_q} = K_q (0.9 - U_T) I_N$ 0.2 p.u. $\leq U_T \leq 0.9$ p.u. (17) 式中: ΔI_{T_q} 为风电场注入的动态无功电流增量; K_q 为 风电场动态无功电流比例系数,其取值范围应不小 于 1.5 且不大于 3; U_T 为风电场并网点电压; I_N 为风电 场额定电流。

3)DFIG 变流器容量约束。DFIG 变流器的电流 输出能力有限,过载将会危及变流器的运行安全^[6], 因此,也应考虑DFIG 变流器的电流容量约束。

3.2 有功和无功电流分配原则

虽然 DFIG 的定子侧和 GSC 都能向电网输出无 功电流,但两者的输出能力不尽相同。考虑 DFIG 定 转子绕组之间的匝比及运行转差,当在转子侧注入 一定量的无功电流时,DFIG 的定子侧将会输出数倍 的无功电流,而 GSC 并没有这种特点,且 GSC 容量较 小,因此其无功电流输出能力相对有限。为此,本文 根据电网导则要求,设计无功电流主要由 RSC 控制, 由 DFIG 定子侧输出,而 GSC 主要负责维系直流母线 电压稳定,不直接参与响应动态无功电流。在该情 形下,DFIG 定子无功电流增量 ΔI_{sq} 等于 DFIG 并网电 流增量 ΔI_{rq} ,即:

$$\Delta I_{sq} = \Delta I_{Tq} \tag{18}$$

此时,由定子侧注入电网的无功电流最小值 I_{sq}^{min} 应为电压跌落前输出无功电流 I_{sq0} 与动态无功电流增量 ΔI_{rq} 之和,即:

$$I_{sq}^{\min} = I_{sq0} + \Delta I_{Tq} \tag{19}$$

因此,基于系统稳定性约束、电网导则约束、 DFIG变流器容量约束的有功电流、无功电流约束区 域可以描述为:

$$\begin{vmatrix} \left| I_{sq}^{\min} \right| \leq \left| I_{sq} \right| \\ I_{sd}^{2} + I_{sq}^{2} \leq I_{cap}^{2} \\ \left| I_{sq} \right| \leq \left| f_{fit} (I_{sd}, U_{sd}) \right| \end{aligned}$$
(20)

式中: *I*_{cap}为 DFIG 变流器容量约束下定子电流输出 最大值,通常取 1.2 倍的额定电流^[16]; *f*_{ff}(*I*_{sd}, *U*_{sd})为 DFIG 的临界稳定曲线,基于所推导的导纳模型,可 采用广义奈奎斯特判据分析拟合得到。

根据式(20),可以得到在满系统稳定性约束、电 网导则约束、DFIG变流器容量约束条件下 DFIG 的 稳定运行区域,即附录 A 图 A8 中合理运行区域部 分。该区域即为弱电网电压跌落期间 DFIG 有功、无 功电流建议的分配方式,分配原则为:

1)在保证系统稳定性的前提下,满足DFIG动态 无功支撑的要求,同时考虑变流器的电流输出能力;

2)针对不同强弱程度的电网,需根据导纳模型 重新拟合稳定性临界曲线(附录A图A8中紫色曲线);

3)针对不同的电网电压跌落情况,需根据式

(17)、(19)重新计算动态无功电流下限(附录A图 A8中红色曲线)。

4 实验验证

为了验证理论分析结果的正确性,搭建基于 DSP TMS320F28335的5.5kW DFIG实验平台,如 附录A图A9所示,实验系统的关键参数如附录A表 A2所示。该平台采用三相异步电动机拖动双馈发 电机,并用串联电抗器模拟输电线路阻抗。

为验证本文稳定性分析的正确性,以电网电压 跌落至0.5 p.u.为例,改变RSC有功电流指令进行测 试,实验结果如附录A图A10所示。由图可知:在 0.4 s前,DFIG向电网注入0.4 p.u.有功电流和0.45 p.u. 无功电流,此时系统是稳定的;在0.4 s时,将有功电 流从0.4 p.u.变为0.8 p.u.,DFIG定子三相电流以及 定子电流*d*,q轴波形出现明显振荡,主要振荡频率 为19.27 Hz和80.72 Hz,系统进入不稳定状态。

附录A图A11为向电网注入不同无功电流时的 定子电流实验波形以及局部放大图。实验中,在保 证向电网注入有功电流0.2 p.u.不变的前提下,在 20.2、26.1、34.3、53.5 s逐渐将注入弱电网的无功电 流从0.2 p.u.增大至1.0 p.u.,通过图A11(b)的电流 局部放大图可见,在增大无功电流的过程中,DFIG 系统均能保持稳定,即无功电流变化对系统稳定性 的影响较小,这与前文理论分析得到的结论一致。

为进一步验证附录A图A8所示DFIG稳定运行 区域的正确性,本文设计如下实验,如附录A图A8 中黑色虚线箭头所示:首先,DFIG运行于合理运行 区域的运行点A,改变DFIG电流指令,使DFIG工作 点切换至无功支撑不足区点B;然后,再次改变电流 指令,切换DFIG的工作点至不稳定区点C;最终,将 DFIG的工作点切换回运行点A。运行点A、B、C的电 流指令值如表1所示(表中电流指令值均为标幺值)。 实验结果如图6所示。由图可见:在T,时刻前,DFIG 工作在运行点A,DFIG能稳定运行,且无功满足动态 无功支撑要求;在T₁时刻,当DFIG切换至运行点B 后,其虽能稳定运行,但无功电流低于动态无功支撑 要求值;在T,时刻,当DFIG切换至运行点C后,并网 电流波形出现明显振荡,DFIG已不能稳定运行;在 T。时刻, DFIG 切换回运行点A, 其恢复稳定运行状 态。该实验结果与附录A图A8的划分区域一致,证 明了本文所提DFIG稳定运行区域的正确性。

表1 运行点处的电流指令值

Table 1 Current command of operating points

运行点	电流指令值
A	$I_{sd} = -0.5$, $I_{sq} = 0.6$
В	$I_{sd} = -0.3$, $I_{sq} = 0.3$
С	$I_{sd} = -0.8$, $I_{sd} = 0.4$



图6 不同运行点的实验结果

Fig.6 Experimental results of different operating points

5 结论

本文聚焦DFIG在弱电网故障情况下的稳定性 问题,建立DFIG系统的小信号导纳模型,其中包含 DFIG本体、RSC、GSC、锁相环等环节,利用阻抗扫频 法验证了该模型的准确性。在该模型的基础上,采 用广义奈奎斯特稳定性判据分析有功电流、无功电 流对接入弱电网的DFIG系统稳定性的影响,分析结 果表明:DFIG系统稳定性主要由有功电流决定,且 有功电流对稳定性的影响是通过电网阻抗、锁相环 和坐标变换实现的。基于上述分析,本文综合考虑 系统稳定性约束、电网导则约束、DFIG变流器容量 约束,提出弱电网情况下DFIG有功电流和无功电流 的分配原则,并推导出DFIG在该类工况下的电流合 理设置区间。这为弱电网发生电压跌落故障时 DFIG有功、无功电流指令的设置提供了指导。最后 通过实验结果验证了上述分析,证明了所提方法的 正确性和有效性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 袁辉,宋晓喆,孙福寿,等.弱电网中低电压穿越控制策略导致的双馈风机失稳机理分析[J].电力自动化设备,2020,40(9): 50-58.

YUAN Hui, SONG Xiaozhe, SUN Fushou, et al. Analysis of LVRT control strategy-oriented DFIG instability mechanism in weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9);50-58.

- [2] SHABESTARY M M, MORTAZAVIAN S, MOHAMED Y I. Overview of voltage support strategies in grid-connected VSCs under unbalanced grid faults considering LVRT and HVRT requirements[C]//2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering. Oshawa, ON, Canada; IEEE, 2018:145-149.
- [3]国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入 电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1— 2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [4] 贺益康,徐海亮.双馈风电机组电网适应性问题及其谐振控制 解决方案[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5188-5203.
 HE Yikang,XU Hailiang. The grid adaptability problem of DFIG-based wind turbines and its solution by resonant control scheme[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5188-5203.
- [5]年珩,周骐,吴超,等.双馈风电机组并网运行下谐波电流建模 与特性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(17):5037-5048, 5285.

NIAN Heng, ZHOU Qi, WU Chao, et al. The modeling and characteristic analysis of harmonic current of DFIG based wind turbine in grid-connected mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5037-5048, 5285.

- [6]刘洪波,彭晓宇,张崇,等.风电参与电力系统调频控制策略综述[J].电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
 LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(11):81-92.
- [7] XU H L, ZHANG Y F, LI Z, et al. Reactive Current constraints and coordinated control of DFIG's RSC and GSC during asymmetric grid condition[J]. IEEE Access, 2020(8): 184339-184349.
- [8] 谢震,许可宝,秦世耀,等.基于电压源型和电流源型双馈风电机组稳定性对比分析[J].电网技术,2021,45(5):1724-1735.
 XIE Zhen,XU Kebao,QIN Shiyao,et al. Comparative analysis of doubly-fed wind turbine stability based on voltage source and current source[J]. Power System Technology,2021,45(5): 1724-1735.
- [9] 周鹏,张新燕,邸强,等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组 预同步并网策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):71-78. ZHOU Peng,ZHANG Xinyan,DI Qiang,et al. Pre-synchronous grid-connection strategy of DFIG-based wind turbine with virtual synchronous generator control[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(14):71-78.
- [10] 邵昊舒,蔡旭,周党生,等.风电机组虚拟同步及惯量控制方法 分析与测试评估[J].高电压技术,2020,46(5):1528-1537.
 SHAO Haoshu,CAI Xu,ZHOU Dangsheng, et al. Analysis and test evaluation of VSG and virtual inertia control method for wind turbine[J]. High Voltage Engineering,2020,46(5):1528-1537.
- [11] 王清,毕天姝,薛安成. 基于相似性的双馈风机小干扰稳定性 分析及锁相环的影响[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):30-34,84.

WANG Qing, BI Tianshu, XUE Ancheng. Similarity-based small-

signal stability analysis of DFIG-based wind turbines and influence of phase-locked loop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 30-34, 84.

- [12] 薛安成,王清,毕天姝.双馈风机与同步机小扰动功角互作用 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] ZHAO M Q, YUAN X M, HU J B. Modeling of DFIG wind turbine based on internal voltage motion equation in power systems phase-amplitude dynamics analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1484-1495.
- [14] LIU R K, YAO J, WANG X W, et al. Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1):303-318.
- [15] 张学广,马彦,王天一,等. 弱电网下双馈发电机输入导纳建模 及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1507-1516.
 ZHANG Xueguang, MA Yan, WANG Tianyi, et al. Input admittance modeling and stability analysis of DFIG under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(5):1507-1516.
- [16] XU Y Y, NIAN H, WANG T, et al. Frequency coupling characteristic modeling and stability analysis of doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018,33(3):1475-1486.
- [17] ZHANG X G, ZHANG Y G, FANG R, et al. Impedance modeling and SSR analysis of DFIG using complex vector theory[J]. IEEE Access, 2019(7):155860-155870.
- [18] SHI F, SHU D, YAN Z, et al. A shifted frequency impedance model of Doubly Fed Induction Generator(DFIG)-based wind farms and its applications on S2SI analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1):215-227.
- [19] 陈武晖,宿端鹏,汪旎,等. 双馈风电场感应发电机效应的风 险区域变化机理[J]. 中国电机工程学报,2016,36(20);5469-5478,5723.

CHEN Wuhui,SU Duanpeng,WANG Ni,et al. Evolving mechanism of risk region for induction generator effect of doublyfed wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5469-5478, 5723.

- [20] HOSSAIN M J, SAHA T K, MITHULANANTHAN N, et al. Control strategies for augmenting LVRT capability of DFIGs in interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6):2510-2522.
- [21] 刘其辉,毛未,高瑜.提升无功调节能力的双馈式风力发电机 转速变模式控制策略[J].电力自动化设备,2018,38(9):85-92.
 LIU Qihui, MAO Wei, GAO Yu. Variant mode control strategy of rotor speed for DFIG in promoting reactive power adjustment ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):85-92.
- [22] 姚骏,郭利莎,陈知前,等. 电网电压不平衡下双馈型风电场可 控运行区域及其控制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(20): 181-191.

YAO Jun, GUO Lisha, CHEN Zhiqian, et al. Control strategy of doubly-fed type based wind farm and its controllable operation area under unbalanced grid voltage condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20):181-191.

[23] 邵昊舒,王磊,蔡旭.提高双馈风电机组LVRT能力的改进直接功率控制[J].电力自动化设备,2019,39(7):15-22.
SHAO Haoshu, WANG Lei, CAI Xu. Modified direct power control for improving LVRT ability of doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (7):15-22.

作者简介:



徐海亮(1985—),男,教授,博士,通信 作者,主要研究方向为新能源发电及微电 网(**E-mail**;xul@upc.edu.cn);

李 志(1997—),男,硕士研究生,研究 方向为风力发电并网系统的建模、稳定性 分析及其控制(**E-mail**:dqlizhi@163.com);

王中行(1997—),男,硕士研究生,研 究方向为双馈无刷风力发电机的建模、控 制(**E-mail**;wzx_upc@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Stability analysis and current distribution method of DFIG during low voltage ride-through

XU Hailiang, LI Zhi, WANG Zhongxing

(College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In the condition of weak grid, complex interaction between DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) and grid impendance may occur, if the active and reactive currents are set improperly during low voltage ride-through, the system will face the risk of instability, for which, a small signal admittance model of DFIG is established, the instability mechanism of the system is analyzed, especially the influence rule of transmission line impedance, phase locked loop and other factors on stability is clarified. The active and reactive current distribution principle of DFIG is proposed, which satisfies the response criterion of reactive current, capacity limit of the converter and stability constraint of the system, the stable operation range of the system is derived to provide guideline for the current setting of DFIG under weak grid. Experimental results show that the influence rules of active and reactive currents on stability are different, compared with the reactive current, the influence of active current on stability is more significant, which verifies the correctness of theoretical analysis, and the effectiveness of the proposed current distribution method is further verified.

Key words: doubly-fed induction generator; weak grid; low voltage ride-through; stability; current reference



附录 A



Fig.A1 Open loop admittance model of DFIG



注: ω₀为角频率初值。 图 A2 锁相环原理图 Fig.A2 Principle diagram of PLL



图 A3 计及主电路、转子电流环和锁相环的机侧导纳模型

Fig.A3 Admittance model of rotor side considering main circuit, rotor current loop and PLL



图 A4 GSC 导纳模型 Fig.A4 Admittance model of GSC





Fig.A5 Bode diagram of RSC admittance and whole admittance of DFIG

Table A1 Key system parameters of 3.0 MW DFIG				
参数	数值	参数	数值	
$U_{ m N}$ /V	690	$L_{ m r}$	4.203	
р	3	$L_{\rm m}$	3.99	
$R_{\rm s}$	0.013	$R_{ m g}$	0.003	
$R_{ m r}$	0.024	$L_{ m g}$	0.65	
$L_{ m eq}$	0.213	$V_{ m dc}/ m V$	1200	
$L_{ m s}$	4.229	$T_{\rm s}/{ m s}$	5×10 ⁻⁶	
注, 由阳与由咸参数均为标乡值				

表 A1 3.0 MW DFIG 系统关键参数

注: 电阻与电感参数均为标幺值。



图 A6 有功电流变化时的广义奈奎斯特曲线 Fig.A6 Generalized Nyquist curves when active current changes







图 A8 多约束下的双馈风电机组稳定运行区域

Fig.A8 Stable operation area under multiple constraints



图 A9 DFIG 实验平台 Fig.A9 Experimental platform of DFIG

表 A2 实验平台关键参数 Table A2 Key parameters of experimental platform				
参数	数值	参数	数值	
额定功率/kW	5.5	$R_{\rm r}/\Omega$	2.3	
额定电压/V	380	$L_{\rm s}/{ m H}$	0.129	
额定电流/A	8.33	$L_{\rm r}/{ m H}$	0.129	
匝比	1.63	$L_{\rm m}/{\rm H})=$	0.123	
$V_{ m dc}$ /V	600	$\omega_{\rm r}/({\rm r} \bullet {\rm min}^{-1})$	800	
$R_{\rm s}/\Omega$	1.1	$T_{\rm s}/{\rm s}$	10^{-4}	



图 A10 有功电流变化时的实验结果 Fig.A10 Experimental results when active current changes



图 A11 无功电流变化时的实验结果 Fig.A11 Experimental results when reactive current changes