

考虑换流器外环特性的双馈风电场并网稳定性分析

孙 瑶¹, 韩民晓¹, 黄永宁², 张汉花²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 宁夏电力安全重点实验室, 国网宁夏电力科学研究院, 宁夏 银川 750002)

摘要: 大规模风电并网引起的宽频振荡稳定性问题日益突出, 为定量分析系统参数的作用, 亟需建立用于分析风电并网稳定性的准确阻抗模型。本文利用阻抗分析法在同步旋转坐标系下建立了包含风机、转子侧与电网侧换流器内外环及其锁相环、直流环节的换流器控制回路、出口滤波器和变压器的双馈风机阻抗模型。对比部分阻抗与完整阻抗模型阻频特性曲线, 证明了考虑外环控制、直流环节以及锁相环对风机阻抗模型的必要性。利用广义奈奎斯特稳定判据分析系统各参数对风机并网稳定性的影响, 结果表明, 转子侧换流器控制参数、电网侧换流器直流外环控制参数以及系统电感对稳定性有明显影响。最后利用在 PSCAD 中建立的宁夏麻黄山风电场模型进行仿真验证。

关键词: 双馈风机; 并网稳定性; 阻抗模型; 阻频特性; 广义奈奎斯特稳定判据

DOI: 10.12067/ATEEE2006003

文章编号: 1003-3076(2021)02-0015-10

中图分类号: TM315

1 引言

随着新能源比例增大, 换流器控制及其与电网交互作用引起的风电场并网稳定性问题得到了广泛关注, 将在今后较长一段时间内持续威胁电网安全运行。为了定量分析影响因子对稳定性的作用, 阻抗分析法得到广泛应用^[1-4], 在时域系统中普遍使用序阻抗分析法, 在复频域中使用 dq 坐标系下的阻抗模型。序阻抗分析法需要在时域中对电压电流进行傅里叶变换, 基波量经 dq 变换得到直流量, 扰动量经变换得到交流量, 由功率计算式得到的波动功率都是零, 所以现有序阻抗模型^[5-13]仅用于研究换流器内环控制参数对系统稳定性影响的问题。因此为研究功率外环对风机并网系统的影响, 必须模糊扰动量具体表达式, 使用 dq 坐标系下小信号分析法可以研究功率外环以及直流母线上的功率波动量对阻抗模型的影响。

在现有研究中, 文献[8]建立了只考虑转子侧换流器(Rotor-Side Converter, RSC)参数影响的风机阻抗模型。文献[9]建立了考虑 RSC 与电网侧换流器(Grid-Side Controller, GSC)的风机模型, 指出由于 GSC 等效阻抗较大, 且为输入阻抗电路的并联支

路, 所以忽略了 GSC 控制器参数对输入阻抗的影响。实际上, 在不稳定状态时, RSC 侧波动会通过直流环节传递至 GSC, 若要建立完整的风机阻抗模型, 考虑两侧换流器以及直流环节是有必要的。文献[10, 11]考虑了励磁互感, 在静止坐标系中建立了风机模型, 但依然忽略了 GSC 支路。以上研究均只考虑内环控制, 而风机换流器一般采用双环控制, 由于外环控制时间常数较大而被忽略, 但对于建立用于分析中低频段的阻抗模型, 外环是有必要考虑在内的。文献[14]考虑外环建立的模型可以较准确反映风机低频段的阻抗, 但仍未完整考虑其他电路部分。现用于分析风电场并网稳定性的阻抗模型多数只考虑内环以及锁相环, 无法准确体现风机阻抗的低频部分, 也无法直观分析电网、控制电路以及电机两两之间的交互作用。而对于稳定性分析, 只有在准确的阻抗模型下, 才可以定量分析各控制系数在不稳定状态下的参数范围。

本文在 dq 坐标系下建立了考虑了风机、包含 RSC 与 GSC 及其锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)、直流环节的换流器控制回路、出口滤波器和变压器的双馈风机(Double Fed Induction Generator, DFIG)阻抗模型。利用宁夏麻黄山风电场风机实际

收稿日期: 2020-06-01

作者简介: 孙 瑶(1995-), 女, 浙江籍, 硕士研究生, 研究方向为多换流器风电场并网稳定性;

韩民晓(1963-), 男, 陕西籍, 教授, 博士, 研究方向为电力系统仿真、电能质量、柔性电力技术。

参数建立模型,对比了各部分对风机阻频特性的影响,证明考虑直流环节以及 PLL 对风机阻抗模型的必要性。最后用广义奈奎斯特稳定判据分析各系统参数对风机并网稳定性的影响,找出具体影响稳定性的参数范围,并用宁夏电网麻黄山双馈风电场仿真算例验证其正确性。

2 DFIG 阻抗建模

为在 dq 坐标系下建立 DFIG 阻抗模型,需要得到风机出口电压与电流的关系,其中各处电压电流关系,如图 1 所示。

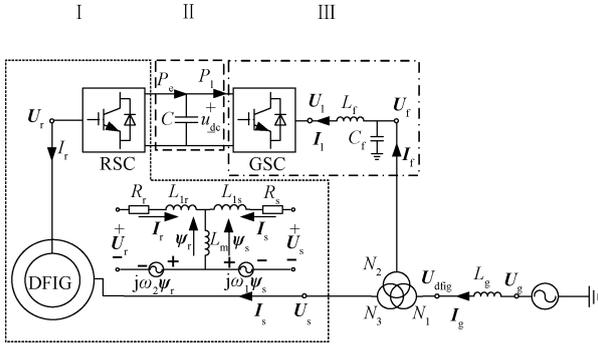


图 1 DFIG 电压电流关系示意图

Fig.1 Relationship of voltage and current in DFIG

其中, U_r 与 I_r 、 U_s 与 I_s 分别为转子、定子的出口电压与电流, U_1 与 I_1 、 U_f 与 I_f 分别为 GSC 出口、经滤波器出口的电压与电流, U_{dfg} 与 I_g 分别为 DFIG 出口电压与电流, U_g 为电网电压。

为研究风电机本身对电网次同步振荡的影响,利用小信号线性化法建立包含风机主电路与换流器控制电路的阻抗模型,能够用于分析 DFIG 并网系统中各参数对系统稳定性的影响。用小信号分析法进行线性化,统一用式(1)矩阵形式表示。

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \Delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta x_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \mathbf{x} 为任一 dq 坐标系下的矩阵变量; \mathbf{X} 为稳态初值; $\Delta\mathbf{x}$ 为小信号矩阵变量。

2.1 考虑定转子关系的 RSC 模型

DFIG 等效电路如图 1 中 I 框所示。定转子均采用电动机惯例。定子同步角频率为 ω_1 , 转子旋转角频率为 ω_r , 转子参数均已折算至定子侧, 折算后定、转子绕组匝数相同。

定转子电流电压小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta\mathbf{u}_s = \mathbf{G}_{zs}\Delta\mathbf{i}_s + \mathbf{G}_{zms}\Delta\mathbf{i}_r \\ \Delta\mathbf{u}_r = \mathbf{G}_{zr}\Delta\mathbf{i}_r + \mathbf{G}_{zmr}\Delta\mathbf{i}_s \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{G}_{zs} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_1 L_s \\ \omega_1 L_s & R_s + sL_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{zr} = \begin{bmatrix} R_r + sL_r & -\omega_2 L_r \\ \omega_2 L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_{zms} = \begin{bmatrix} sL_m & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_m & sL_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{zmr} = \begin{bmatrix} sL_m & -\omega_2 L_m \\ \omega_2 L_m & sL_m \end{bmatrix}$$

式中, ω_1 为定子角频率; ω_2 为转差角频率; L_m 为定、转子同轴等效绕组间的互感; L_s 为定子等效两相绕组自感; L_r 为转子等效两相绕组自感; L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定、转子漏感。

转子侧控制回路采用双环解耦控制方式,如图 2 所示,其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 为电机漏磁系数, H_n 为内环 PI 环节, H_w 为电流外环控制环节。下标 s 代表定子出口电气量,下标 r 代表转子出口电气量, ref 代表计算所得或给定的参考值。

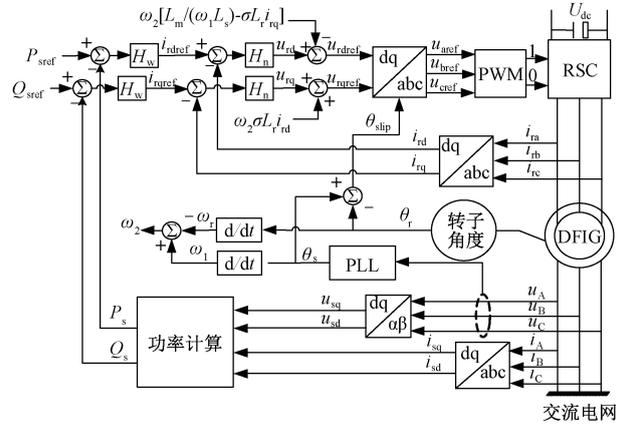


图 2 RSC 的矢量控制框图

Fig.2 Control block diagram of RSC

内环电压参考值为:

$$\Delta\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{H}_{nn}(\Delta\mathbf{i}_{ref} - \Delta\mathbf{i}_r) + \mathbf{G}_{dd}\Delta\mathbf{i}_r \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{H}_{nn} = \begin{bmatrix} H_n & 0 \\ 0 & H_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{dd} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_2 \sigma L_r \\ \omega_2 \sigma L_r & 0 \end{bmatrix}$$

外环为 PQ 解耦控制, 电流参考值为:

$$\Delta\mathbf{i}_{ref} = \mathbf{H}_{ww} \begin{bmatrix} -\Delta P_s \\ -\Delta Q_s \end{bmatrix} = -\mathbf{H}_{ww}(\mathbf{G}_{pi}\Delta\mathbf{u}_s + \mathbf{G}_{pu}\Delta\mathbf{i}_s) \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{H}_{ww} = \begin{bmatrix} H_w & 0 \\ 0 & H_w \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{pi} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_{sd} & I_{sq} \\ I_{sq} & -I_{sd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_{pu} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_{sd} & U_{sq} \\ -U_{sq} & U_{sd} \end{bmatrix}$$

式中, U 、 I 分别为系统稳定运行状态下的电压、电流值。

PLL 可以将电网波动传递至控制回路,其中 PLL 的传递函数为:

$$T_{\text{PLL}} = \frac{H_{\text{PLL}}}{1 + U_s H_{\text{PLL}}} = \frac{sK_{\text{pp}} + K_{\text{pi}}}{s^2 + U_s(sK_{\text{pp}} + K_{\text{pi}})} \quad (5)$$

式中, $H_{\text{PLL}} = K_{\text{pp}} + K_{\text{pi}}/s$ 为锁相环 PI 环节传递函数。

电网电压扰动后的定转子电压与电流为:

$$\begin{cases} \Delta i'_s = \Delta i_s + G_{\text{PLL}}^{\text{is}} \Delta u_s \\ \Delta i'_r = \Delta i_r + G_{\text{PLL}}^{\text{ir}} \Delta u_s \\ \Delta u'_s = \Delta u_s + G_{\text{PLL}}^{\text{us}} \Delta u_s \\ \Delta u_r = \Delta u_{\text{rref}} + G_{\text{PLL}}^{\text{ur}} \Delta u_s \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} G_{\text{PLL}}^{\text{is}} &= T_{\text{PLL}} \begin{bmatrix} 0 & I_{\text{sq}} \\ 0 & -I_{\text{sd}} \end{bmatrix} & G_{\text{PLL}}^{\text{ir}} &= T_{\text{PLL}} \begin{bmatrix} 0 & I_{\text{rq}} \\ 0 & -I_{\text{rd}} \end{bmatrix} \\ G_{\text{PLL}}^{\text{us}} &= T_{\text{PLL}} \begin{bmatrix} 0 & U_{\text{sq}} \\ 0 & -U_{\text{sd}} \end{bmatrix} & G_{\text{PLL}}^{\text{ur}} &= T_{\text{PLL}} \begin{bmatrix} 0 & -U_{\text{rqref}} \\ 0 & U_{\text{rdref}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

综合式(3)、式(4)、式(6)得到转子侧控制电路等效阻抗表达式,再由式(2)消去定子电流,可以得到转子侧控制器小信号阻抗模型。

$$\Delta u_r = Z_{\text{RSC}} \Delta i_r + K_{\text{usr}} \Delta u_s \quad (7)$$

其中

$$Z_{\text{RSC}} = [E + H_{\text{nn}} H_{\text{ww}} G_{\text{pu}} G_{\text{zmr}}^{-1}]^{-1} (G_{\text{dd}} - H_{\text{nn}} + H_{\text{nn}} H_{\text{ww}} G_{\text{pu}} G_{\text{zmr}}^{-1} G_{\text{zr}})$$

$$K_{\text{usr}} = [E + H_{\text{nn}} H_{\text{ww}} G_{\text{pu}} G_{\text{zmr}}^{-1}]^{-1} [(G_{\text{dd}} - H_{\text{nn}}) G_{\text{PLL}}^{\text{ir}} - H_{\text{nn}} H_{\text{ww}} G_{\text{pu}} G_{\text{PLL}}^{\text{is}} - H_{\text{nn}} H_{\text{ww}} G_{\text{pi}} (E + G_{\text{PLL}}^{\text{us}}) + G_{\text{PLL}}^{\text{ur}}]$$

式中, Z_{RSC} 为转子侧控制电路等效输入阻抗; K_{usr} 为定子电压通过 PLL 的交互作用对转子电压的影响系数,其与稳态工作点、RSC 与 PLL 的控制参数、电机电路参数有关。

2.2 考虑直流环节的 GSC 模型

直流环节在正常工作状态下可以起到电气隔离的作用,但在次同步振荡状态下,直流环节会成为转子侧控制回路与网侧控制回路波动传递的桥梁。直流环节如图 1 中 II 框所示, u_{dc} 为直流电压, P_e 为转子侧有功功率, P_1 为网侧有功功率,功率守恒公式经小信号线性化写成矩阵形式:

$$\begin{aligned} G_{\text{dc}} \Delta u_{\text{dc}} &= \Delta P_1 - \Delta P_e \\ &= G_{\text{li}} \Delta u_1 + G_{\text{lu}} \Delta i_1 - G_{\text{ri}} \Delta u_r - G_{\text{ru}} \Delta i_r \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} G_{\text{dc}} &= \begin{bmatrix} sCU_{\text{dc}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & G_{\text{ri}} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_{\text{rd}} & I_{\text{rq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & G_{\text{ru}} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_{\text{rd}} & U_{\text{rq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ G_{\text{li}} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_{\text{ld}} & I_{\text{lq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & G_{\text{lu}} &= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_{\text{ld}} & U_{\text{lq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

GSC 出口电路如图 1 中 III 框所示,电压(KVL)等式经小信号线性化得:

$$\Delta u_1 = \Delta u_f - G_{\text{zl}} \Delta i_1 \quad (9)$$

其中

$$G_{\text{zl}} = L_f \begin{bmatrix} s & -\omega \\ \omega & s \end{bmatrix}$$

电流(KCL)等式经过小信号线性化写成矩阵形式:

$$\Delta i_f = G_{\text{zc}} \Delta u_1 + \Delta i_1 + G_{\text{cl}} \Delta i_1 \quad (10)$$

其中

$$G_{\text{zc}} = C_f \begin{bmatrix} s & -\omega \\ \omega & s \end{bmatrix} \quad G_{\text{cl}} = C_f L_f \begin{bmatrix} s^2 - \omega^2 & -2s\omega \\ 2s\omega & s^2 - \omega^2 \end{bmatrix}$$

GSC 通常采用双环控制,外环控制直流电压和无功,内环控制电流,GSC 的矢量控制框图如图 3 所示。当 GSC 零无功运行时, $i_{\text{qgref}} = 0$,其中 H_p 为 d 轴电流内环控制环节, H_q 为 q 轴电流内环控制环节,内环电压参考值矩阵形式为:

$$\Delta u_{\text{lref}} = H_{\text{pq}} (\Delta i_{\text{lref}} - \Delta i_1) + \Delta u_f + G_{\text{cc}} \Delta i_1 \quad (11)$$

其中

$$H_{\text{pq}} = \begin{bmatrix} -H_p & 0 \\ 0 & -H_q \end{bmatrix} \quad G_{\text{cc}} = \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix}$$

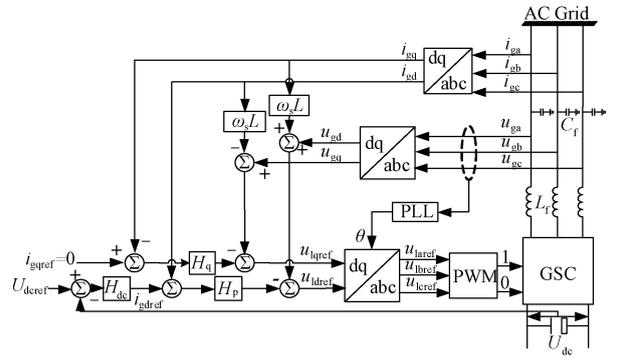


图 3 GSC 的矢量控制框图

Fig.3 Control block diagram of GSC

经直流电压外环控制,得到电流参考值:

$$\Delta i_{\text{lref}} = H_{\text{dc0}} \Delta u_{\text{dc}} \quad (12)$$

其中

$$H_{\text{dc0}} = \begin{bmatrix} -H_{\text{dc}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

电网侧 PLL 与转子侧影响方式相同,都是联系

电网电压与内部控制的中介,所以电网电压波动会造成控制电路内部波动,受 PLL 干扰的电网电压、GSC 出口电流与最终输出的出口电压分别为:

$$\begin{cases} \Delta i'_1 = \Delta i_1 + \mathbf{G}_{PLL}^{il} \Delta u_f \\ \Delta u'_f = \Delta u_f + \mathbf{G}_{PLL}^{uf} \Delta u_f \\ \Delta u_1 = \Delta u_{lref} + \mathbf{G}_{PLL}^{ul} \Delta u_f \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{G}_{PLL}^{il} = T_{PLL} \begin{bmatrix} 0 & I_{lq} \\ 0 & -I_{ld} \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_{PLL}^{uf} = T_{PLL} \begin{bmatrix} 0 & U_{fq} \\ 0 & -U_{fd} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_{PLL}^{ul} = T_{PLL} \begin{bmatrix} 0 & -U_{lqref} \\ 0 & U_{ldref} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{GSC} = [-(\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq}) \mathbf{G}_{PLL}^{il} - \mathbf{G}_{PLL}^{ug} - \mathbf{G}_{PLL}^{ul} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{li} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{lu} \mathbf{G}_{PLL}^{il}]^{-1} \cdot$$

$$[\mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{lu} + \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{lu} \mathbf{G}_{PLL}^{il} \mathbf{G}_{zl} + (\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq})(\mathbf{E} + \mathbf{G}_{PLL}^{il} \mathbf{G}_{zl}) + (\mathbf{E} + \mathbf{G}_{PLL}^{ug} + \mathbf{G}_{PLL}^{ul}) \mathbf{G}_{zl}]$$

$$\mathbf{K}_{usl} = [-(\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq}) \mathbf{G}_{PLL}^{il} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{li} - \mathbf{G}_{PLL}^{ug} - \mathbf{G}_{PLL}^{ul} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{lu} \mathbf{G}_{PLL}^{il}]^{-1} \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{ru} \mathbf{Z}_{RSC}^{-1} \mathbf{K}_{usr}$$

$$\mathbf{K}_{url} = [-(\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq}) \mathbf{G}_{PLL}^{il} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{li} - \mathbf{G}_{PLL}^{ug} - \mathbf{G}_{PLL}^{ul} - \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} \mathbf{G}_{lu} \mathbf{G}_{PLL}^{il}]^{-1} \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \mathbf{G}_{dc}^{-1} (\mathbf{G}_{ru} \mathbf{Z}_{RSC}^{-1} + \mathbf{G}_{ri})$$

GSC 出口电压由网侧阻抗决定,受定转子电压影响,影响系数由网侧控制电路内外环与 PLL 控制参数、直流环节波动以及稳定工作点决定。

通过上述关系式推导,可以得到 DFIG 等效电路,如图 4 所示。

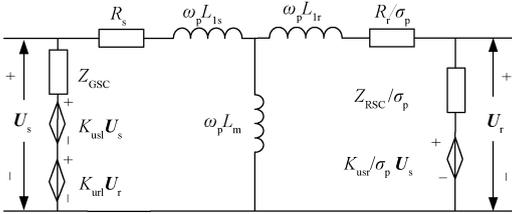


图4 考虑换流器的DFIG等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of DFIG with controller

2.3 考虑滤波器与变压器的阻抗模型

由于变压器的存在,电压电流存在倍数关系:

$$\begin{cases} \Delta u_{dfig} = \frac{N_1}{N_2} \Delta u_f = \frac{N_1}{N_3} \Delta u_s \\ \Delta i_g = \frac{N_2}{N_1} \Delta i_f + \frac{N_3}{N_1} \Delta i_s \end{cases} \quad (16)$$

结合式(2)、式(7)消去转子侧出口电流,可得定子电流与电压的关系:

$$\Delta i_s = [\mathbf{G}_{zs} + \mathbf{G}_{zms} (\mathbf{Z}_{RSC} - \mathbf{G}_{zr})^{-1} \mathbf{G}_{zmr}]^{-1} \cdot$$

$$[\mathbf{E} + \mathbf{G}_{zms} (\mathbf{Z}_{RSC} - \mathbf{G}_{zr}) \mathbf{K}_{usr}] \Delta u_s = \mathbf{Y}_s \Delta u_s \quad (17)$$

由此得到定子电流与电压的关系,为定子支路

综合式(10)、式(12)、式(13)得到电网侧控制电路等效阻抗表达式,再由式(9)消去电网电压,可以得到电网侧控制器小信号阻抗模型。

$$\Delta u_1 = \mathbf{H}_{pq} \mathbf{H}_{dc0} \Delta u_{dc} + (\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq}) \Delta i_1 + [\mathbf{E} + (\mathbf{G}_{cc} - \mathbf{H}_{pq}) \mathbf{G}_{PLL}^{il} + \mathbf{G}_{PLL}^{ug} + \mathbf{G}_{PLL}^{ul}] \cdot (\Delta u_1 + \mathbf{G}_{zl} \Delta i_1) \quad (14)$$

将式(8)代入消去式(14)中的直流电压小信号量,得到 GSC 出口电压与电流的表达式。

$$\Delta u_1 = \mathbf{Z}_{GSC} \Delta i_1 + \mathbf{K}_{usl} \Delta u_s + \mathbf{K}_{url} \Delta u_r \quad (15)$$

其中

输出导纳,包含 DFIG 与 RSC,记为 \mathbf{Y}_s ,即为图 1 上 I 框中部分的出口导纳。

结合式(2)、式(7)、式(9)、式(10)、式(15)、式(16)可以得到 GSC 支路经过滤波器的输入电流与并网电压的关系,并记换流器支路输出导纳为 \mathbf{Y}_f ,即为图 1 上 III 框中部分的出口导纳,II 框中直流环节是两个部分之间传递波动的桥梁,此部分已经归算至网侧导纳中。

$$\mathbf{Y}_f = \frac{N_3}{N_2} [(\mathbf{E} + \mathbf{G}_{cl}) (\mathbf{Z}_{GSC} - \mathbf{G}_{zl})^{-1} \cdot (\frac{N_2}{N_3} \mathbf{E} - \mathbf{K}_{usl} - \mathbf{K}_{url} \mathbf{K}_{sr}) + \mathbf{G}_{zc} \mathbf{K}_{sl}] \quad (18)$$

式中, \mathbf{K}_{sr} 为转子电压与定子电压的比例系数; \mathbf{K}_{sl} 为 GSC 出口电压与定子电压的比例系数。

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{sr} = \mathbf{Z}_{RSC} (\mathbf{Z}_{RSC} - \mathbf{G}_{zl})^{-1} (\mathbf{G}_{zmr} \mathbf{Y}_s - \mathbf{K}_{usr}) + \mathbf{K}_{usr} \\ \mathbf{K}_{sl} = \frac{N_2}{N_3} \mathbf{E} - \mathbf{G}_{zl} (\mathbf{Z}_{GSC} - \mathbf{G}_{zl})^{-1} (\frac{N_2}{N_3} \mathbf{E} - \mathbf{K}_{usl} - \mathbf{K}_{url} \mathbf{K}_{sr}) \end{cases}$$

因此,结合式(16)可以得到考虑换流器控制电路、网侧出口滤波器以及箱变后的 DFIG 等效输入阻抗为:

$$\mathbf{Y}_{dfig} = (\frac{N_2}{N_1})^2 \mathbf{Y}_f + (\frac{N_3}{N_1})^2 \mathbf{Y}_s \quad (19)$$

3 DFIG 阻抗对比分析

本节采用 Bode 图分析 PLL、直流母线和外环对

DFIG 阻抗模型的影响。依照宁夏市麻黄山双馈风机设计参数,在 PSCAD 中建立麻黄山第四风电场的仿真算例,250 台双馈风机,经三级升压变压器,从 0.69 kV 升至 35 kV,再经总线升压,从 35 kV 升至 363 kV,再经架空线路并入大电网,线路等效电阻为 0.03 pu,等效阻抗为 0.5 pu。

其中风电机组参数见表 1。

根据式(23)中 DFIG 等效阻抗表达式,代入 PSCAD 中仿真所得运行参数,先经 Matlab 计算考虑控制电路内环外环、PLL 以及直流环节的完整 DFIG 阻频特性,再分三种情况,依次不考虑直流环节、不考虑 PLL、不考虑外环控制,画出各种情况下的 dd、dq、qd、qq 四象限阻频特性以及相频特性曲线,进行对比,如图 5 所示。

由图 5 可以观察到,若忽略外环控制与直流环节传递波动的影响,阻频特性中低频部分很大程度失真,负电阻范围也不同。直流环节影响反映在 GSC 直流外环控制中,直流环节是 RSC 中波动传递到 GSC 的桥梁,是影响风机阻频特性的重要因素。若忽略 PLL,会影响风机阻抗正负性与容感性。由于该阻频特性曲线仅为现有仿真参数下的风机阻频特性,若需对风机并网进行稳定性分析,还需利用广义奈奎斯特稳定判据对各参数的影响范围进行分析。

表 1 风机仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of DFIG

电机参数	数值	控制参数	数值
额定容量 S /(MV·A)	2	RSC 内环 PI	1.2+0.025/s
额定线电压 V/V	690	RSC 外环 PI	2+0.02/s
额定频率 f /Hz	50	RSC PLL PI	2 222.22+238.095/s
定/转子变比	0.85	GSC 内环 PI	1+0.01/s
定子电阻 R_s (pu)	0.005 4	GSC 中 U_{dc} 外环 PI	0.4+0.01/s
转子电阻 R_r (pu)	0.006 07	GSC PLL PI	1 200+50/s
励磁互感 L_m (pu)	4.5	直流电容 C (pu)	4.396
定子漏感 L_{ls} (pu)	0.099 8	滤波器电感 L_f (pu)	1.524e-6
转子漏感 L_{lr} (pu)	0.109 8	滤波器电容 C_f (pu)	0.061 544
电机漏磁 系数 σ	0.045	变压器变比 $N_{1/2/3}$	35/0.69/0.69

4 DFIG 并网稳定性分析

在 dq 坐标系下建立的风机并网系统阻抗模型为多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 系统,无法直接得到一般化的稳定运行区间,因此可以根据广义奈奎斯特稳定判据^[15]进行稳定分析。

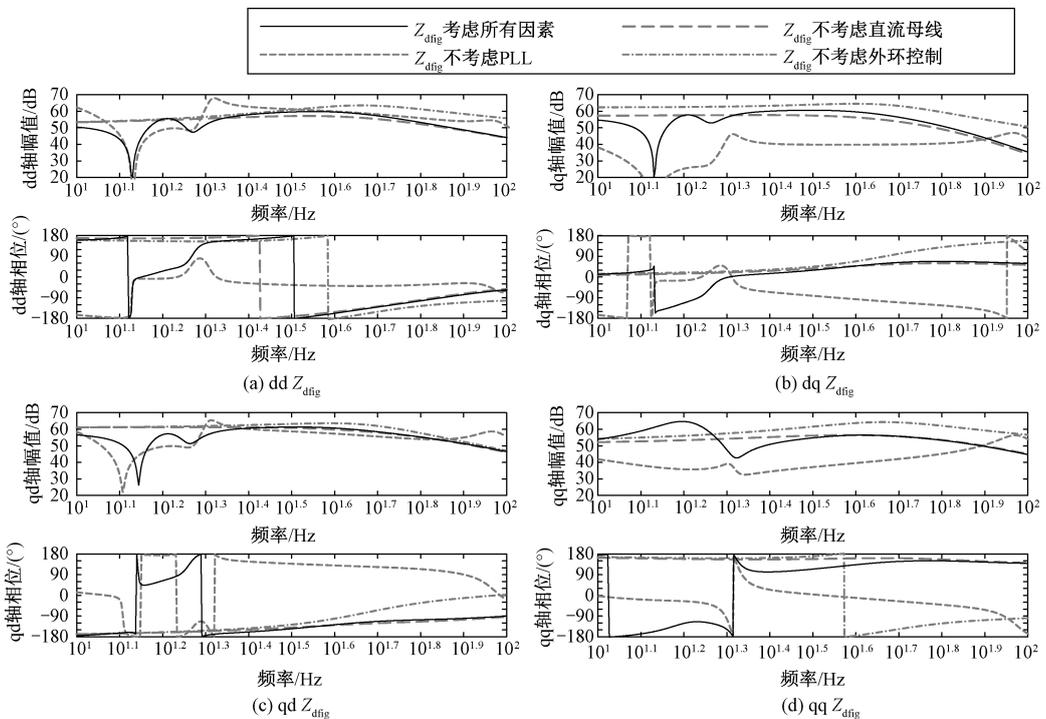


图 5 风电场阻频特性曲线对比图

Fig.5 Contrast of impedance-frequency characteristics

当风电场并入非理想电网时,风机等效阻抗与电网线路阻抗产生谐振效应,并网点电压和电流的关系如下:

$$I_g = \frac{U_g}{Z_g + Z_{dfig}} = \frac{U_g Y_{dfig}}{E + Z_g Y_{dfig}} = \frac{U_g Y_{dfig}}{E + G} \quad (20)$$

其中, Z_g 为 dq 坐标系下的电网阻抗矩阵,即:

$$Z_g = \begin{bmatrix} R_g + L_g s & -\omega L_g \\ \omega L_g & R_g + L_g s \end{bmatrix}$$

式中, G 为回率矩阵^[15],即电网等效阻抗与风机阻抗之比。系统稳定性取决于系统输出端口电压和电流的稳定性,因此若 G 满足 Nyquist 稳定判据,其 Nyquist 曲线不绕过点 $(-1, j0)$ 点时,该风机并网系统稳定,在稳定状态下, Nyquist 曲线越接近 $(-1, j0)$ 点,系统稳定裕度越大。

系统回率矩阵有两个特征值,其特征轨迹如图 6 所示。当参数改变时,外圆曲线永不包围 $(-1, j0)$ 点,内圆曲线可能出现包围情况,为节省运行时间,提高计算效率,仅画出决定稳定性的特征轨迹,即方框中内圆黑色曲线。

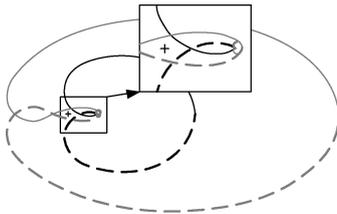


图 6 Nyquist 曲线示意图
Fig.6 Diagram of Nyquist curves

为研究影响风机并网系统稳定性的可能因素,按照五个板块中的参数依次进行稳定性分析:转子侧内环、外环、PLL 参数;网侧内环、外环、PLL 参数;GSC 出口滤波电容电感;直流母线电容;线路电感。设置合理的参数范围与步进系数,观察 Nyquist 曲线呈现靠近 $(-1, j0)$ 点的状态。

4.1 转子侧内环、外环、PLL 控制参数

为研究 RSC 内外环以及 PLL 比例积分参数对系统稳定性的影响,改变其控制参数,系统广义奈奎斯特曲线如图 7 所示。图 7(a)中设置内环比例参数从 0.6 pu 变到 1.2 pu,步进系数 0.2 pu,当参数小于 0.98 pu 时,系统可能处于不稳定状态。

而对于图 7(b)中内环积分变化时稳定性无明显变化,说明该参数不是影响系统稳定性的主要因素。图 7(c)中设置有功率外环比例参数从 0.5~2 pu 的变化范围,当参数处于 1.40~1.62 pu

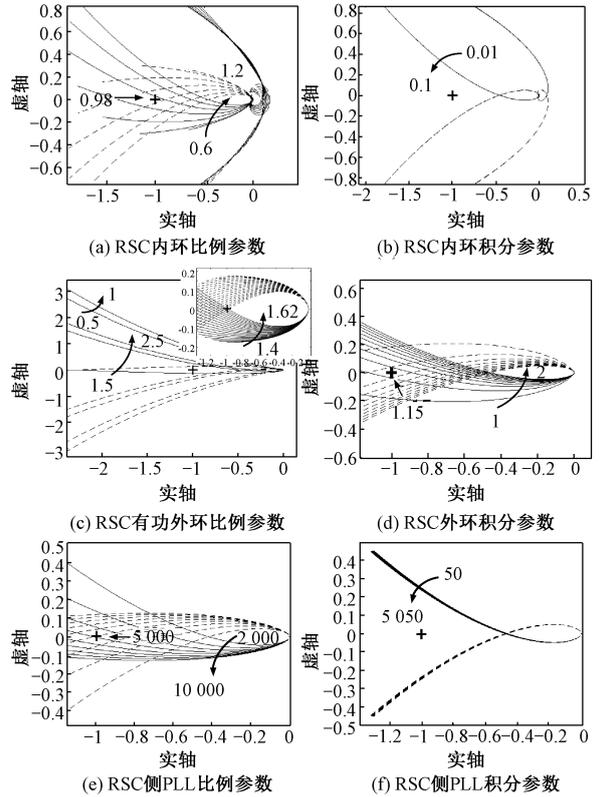


图 7 RSC 内外环以及 PLL 控制参数
Fig.7 PI parameters of inner loop, outer loop and PLL in RSC

时,系统可能处于不稳定状态,但参数小于 1.4 pu 或大于 1.62 pu 时都趋于稳定状态。图 7(d)中设置无功功率外环比例参数从 1 pu 变到 2 pu,当参数小于 1.15 pu 时,系统可能处于不稳定状态。而外环积分参数与内环积分参数一样,对系统稳定性基本无影响。图 7(e)中设置 PLL 比例参数从 20 00 pu 变到 10 000 pu,当参数大于 5 000 pu 时,系统可能处于不稳定状态。图 7(f)中设置积分参数从 50 pu 变到 5 050 pu,随着参数增大,系统稳定裕度增加,但该参数对系统稳定性无决定性影响。

4.2 网侧内环、外环、PLL 控制参数

为研究电 GSC 内外环以及 PLL 比例积分参数对系统稳定性的影响,采用与转子侧相同方法,系统广义奈奎斯特曲线如图 8 所示。图 8(c)中设置直流电压外环比例参数从 0.3 pu 变到 0.8 pu,当参数处于 0.5~0.69 pu 之间时,系统可能处于不稳定状态,但参数小于 0.5 pu 或大于 0.69 pu 时都趋于稳定状态。从图 8 可以看出 GSC 内环比例积分参数、外环积分参数、相环比例积分参数都不是影响系统

稳定性的主要因素。

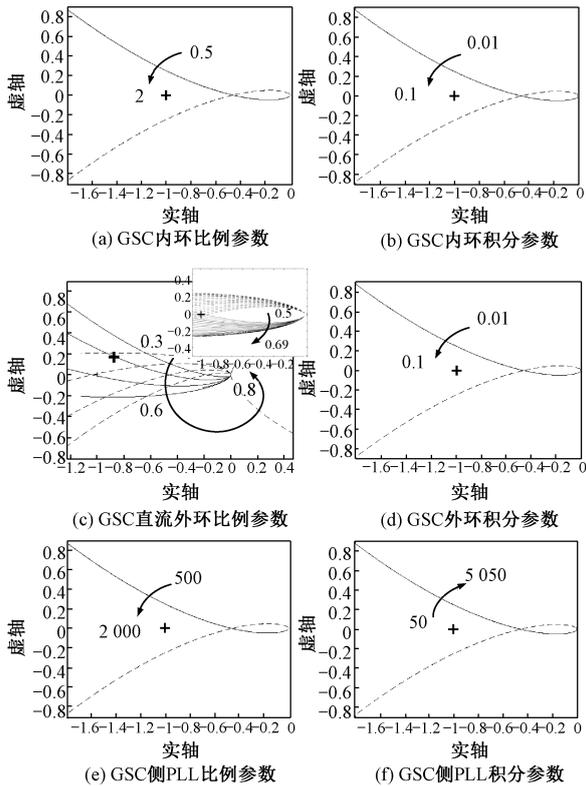


图8 GSC 内外环以及 PLL 控制参数

Fig.8 PI parameters of inner loop, outer loop and PLL in GSC

4.3 GSC 出口滤波器参数

改变 GSC 出口滤波电容电感,系统广义奈奎斯特曲线如图 9 所示。图 9(a)中设置电容参数从 1 pu 变到 10 pu,系统稳定裕度增加,系统稳定性无明显变化。由图 9(b)可见滤波电感参数不是影响系统稳定性的主要因素。

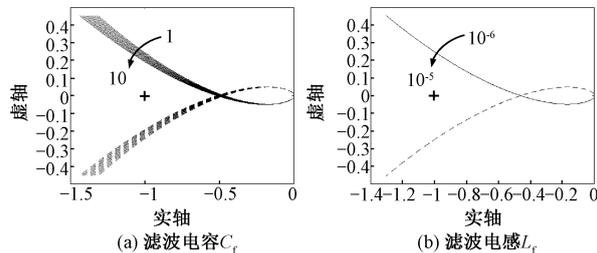


图9 GSC 出口滤波器参数

Fig.9 Outlet filter parameters of GSC

4.4 直流母线电容和线路串抗

改变直流母线电容以及线路电感,系统广义奈奎斯特曲线如图 10 所示。

图 10(a)中设置直流母线电容从 2.5 pu 变到

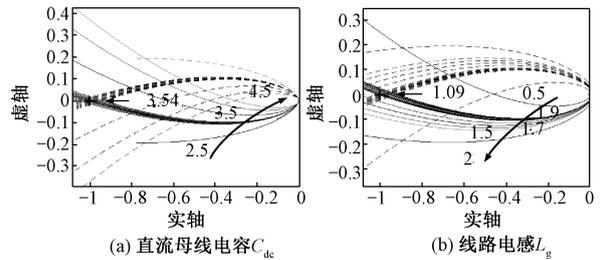


图 10 直流母线电容与线路串抗参数

Fig.10 Capacitance in DC bus and line resistance parameters

4.5 pu,当线路电感小于 3.54 pu 时,Nyquist 曲线包围(-1,j0)点,系统处于不稳定状态。当线路电阻不变时,串抗可以代表短路比,图 10(a)中设置线路电感从 0.5 pu 变到 2 pu,当线路电感大于 1.09 pu 时,Nyquist 曲线包围(-1,j0)点,系统处于不稳定状态,说明短路比越小,系统越不稳定。

综上,DFIG 所有参数中 RSC 内外环以及 PLL 比例参数、电网侧直流外环比例参数、直流母线电容以及系统短路比是影响其并网稳定性的重要因素,当各参数在以下范围取值时,系统可能不稳定运行:

- (1)RSC 内环比例参数设置小于 0.98 pu 时;
- (2)RSC 有功功率外环比例参数处于 1.40 ~ 1.62 pu 之间;
- (3)RSC 侧锁相环比例参数大于5 000 pu 时;
- (4)GSC 直流电压外环比例参数设置大于 0.7 pu 时;
- (5)直流母线电容设置小于 3.54 pu 时;
- (6)线路电感设置大于 1.09 pu 时。

参数中对系统稳定性有影响但影响较小的有:RSC 侧锁相环积分参数、GSC 出口滤波电容参数。这些参数的改变会使系统稳定裕度增加,但对系统稳定性无明显影响,当系统接近临界稳定状态时,改变上述两种参数可能使系统变成不稳定状态。

5 仿真验证

利用在 PSCAD/EMTDC 中建立的麻黄山第四风电场的仿真模型,与第 2 节中 PSCAD 风电场并网模型一致,线路参数以及控制参数均根据实际正常运行的风机参数进行设计,如表 1 所示。改变 RSC 内环控制参数、RSC 有功功率外环控制参数以及 GSC 直流电压外环控制参数,进行仿真验证,仿真结果如图 11 所示。

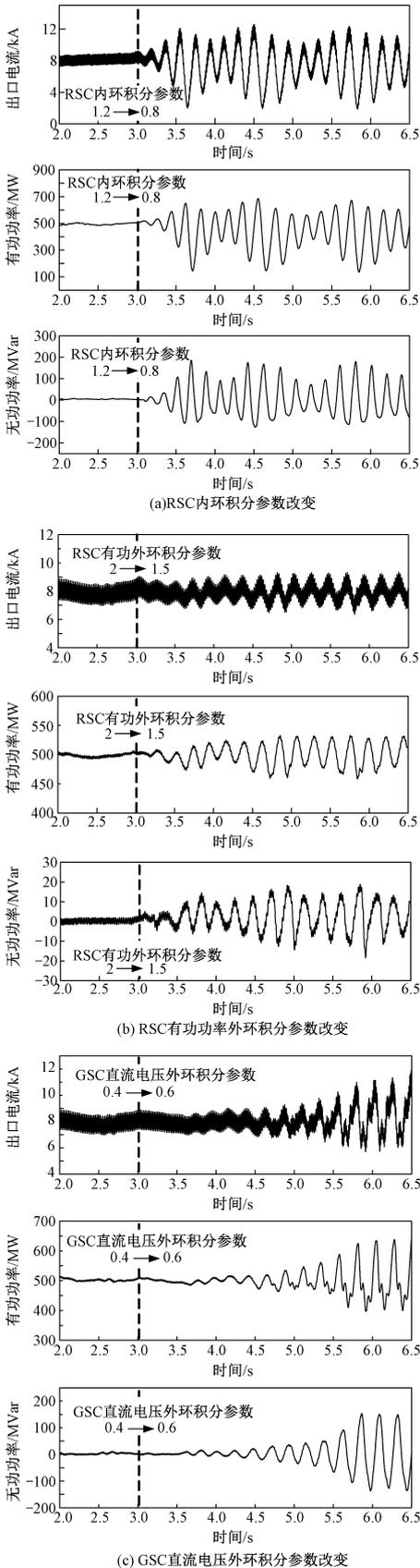


图 11 风电场出口电流、有功功率与无功功率
Fig.11 Current, power and reactive power of wind farm

在风电场正常运行 3 s 后,根据第 3 节中所计算的能够引起风电场振荡的控制参数范围,分别改变风机 RSC 内环控制参数 1.2 pu 为 0.8 pu,风机 RSC 有功功率外环参数 2 pu 为 1.5 pu,风机 GSC 直流电压外环参数 0.4 pu 为 0.6 pu,经过改变控制参数的风电场出口电流、有功功率与无功功率分别对应图 11(a)、图 11(b)、图 11(c),不难看出风电场从 3s 后开始振荡,说明在不稳定参数范围内改变控制参数,风电场稳定性确实会受到影响。其中,图 11(a)中改变 RSC 内环积分参数时,电流与功率振荡幅度较大,振荡发生于改变控制参数瞬间;图 11(b)中改变 RSC 有功功率外环积分参数时,电流与功率振荡幅度较小;图 11(c)中改变 GSC 直流电压外环参数时,振荡在控制参数改变之后才发生,说明 GSC 侧控制效果经直流环节传递到 RSC 侧,两侧换流器相互作用引发振荡。

6 结论

本文在 dq 坐标系下建立了 DFIG 阻抗模型,考虑了 RSC 与 GSC 的内环、外环、PLL,以及两个换流器之间传递波动的直流环节对阻抗模型的影响,画出了完整的阻抗模型在 dq 坐标系下的阻频特性以及忽略 PLL、外环以及直流环节的模型的阻频特性,经对比,考虑这些环节对建立准确的 DFIG 中低频阻抗是必要的。

针对 MIMO 系统,利用广义奈奎斯特稳定判据对该风机并网系统进行稳定性分析,利用 PSCAD 中仿真数据,设置合理参数改变范围,在 Matlab 中画出不同参数下系统 Nyquist 曲线,由此可直观得到 DFIG 并网系统稳定性与 RSC 内环、外环与 PLL 比例参数和直流环节关系较为密切,与系统短路比也有关的结论。利用宁夏电网麻黄山双馈风电场参数建立仿真算例,仿真验证结论的正确性。

建立准确的风机阻抗模型,为准确分析系统参数影响风电场稳定性提供有利支持,同时了解到系统参数对稳定性的不同影响程度,为后续简化用于分析风电场并网稳定性的阻抗模型提供一定依据,在不影响分析准确性的前提下,最大程度简化阻抗模型。

致谢:本文得到宁夏电科院《宁夏电网多换流器次同步振荡机理分析与防范措施研究》科技项目的资助,谨此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等 (Bi Tianshu, Kong Yongle, Xiao Shiwu, et al.). 大规模风电外送中的次同步振荡问题 (Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission) [J]. 电力科学与技术学报 (Journal of Electric Power Science and Technology), 2012, 27 (1): 10-15
- [2] 徐政 (Xu Zheng). 交直流电力系统动态行为分析 (Dynamic behavior analysis of ac-dc power system) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2004: 157-164.
- [3] Zong H, Zhang C, Lyu J, et al. Generalized MIMO sequence impedance modeling and stability analysis of MMC-HVDC with wind farm considering frequency couplings [J]. IEEE Access, 2020 (8): 55602-55618.
- [4] 岳涵, 郑宽, 于洋, 等 (Yue Han, Zheng Kuan, Yu Yang, et al.). 大规模双馈风电接入对东北电网稳定性的影响 (Impact of large-scale DFIG based wind power on stability of Northeast Power Grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (4): 4-9, 23.
- [5] 王亮, 谢小荣, 姜齐荣, 等 (Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang qirong, et al.). 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制 (Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (22): 26-31.
- [6] Ostadi A, Yazdani A, Varma R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3): 1504-1514.
- [7] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (6): 3323-3334.
- [8] 陈新, 张旸, 王赞程 (Chen Xin, Zhang Yang, Wang Bincheng). 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响 (A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 4559-4567.
- [9] Miao Zhixin. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series compensated network [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27 (4): 984-991.
- [10] 廖坤玉, 陶顺, 姚黎婷, 等 (Liao Kunyu, Tao Shun, Yao Liting, et al.). 考虑励磁的DFIG静止坐标系输入阻抗的频域建模与时变特性研究 (Study on frequency-domain modeling and time-varying characteristics of DFIG input impedance with excitation under static reference frame) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (16): 4886-4897.
- [11] 吴恒, 阮新波, 杨东升 (Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng). 弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计 (Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (30): 5259-5268.
- [12] 李凌, 卓毅鑫, 崔长江, 等 (Li Ling, Zhuo Yixin, Cui Changjiang, et al.). 基于阻抗网络分析法的含双馈风电场桂林电网次同步振荡风险评估 (Risk assessment of sub-synchronous oscillation of guilin power grid with doubly-fed wind farms based on impedance network analysis) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (5): 32-40.
- [13] 张学广, 邱望明, 方冉, 等 (Zhang Xueguang, Qiu Wangming, Fang Ran, et al.). 双馈风电机组静止坐标系下阻抗建模及次同步谐振抑制策略 (Impedance modeling and sub-synchronous resonance mitigation strategy of DFIG based wind turbine in static reference frame) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2019, 43 (6): 58-69, 156.
- [14] 刘威, 谢小荣, 黄金魁, 等 (Liu Wei, Xie Xiaorong, Huang Jinkui, et al.). 并网变流器的频率耦合阻抗模型及其稳定性分析 (Frequency-coupled impedance model and stability analysis of grid-connected converter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2019, 43 (3): 202-210.
- [15] 黄伟, 吴琛, 李子恒, 等 (Huang Wei, Wu Chen, Li Ziheng, et al.). 一种利用修正广义阻抗法分析并网逆变器系统稳定性的方法 (A method for analyzing the stability of grid-connected inverter system by using modified generalized impedance) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN106786776A. 2017-05-31.

General impedance model with out-loop for DFIG wind farm stability analysis

SUN Yao¹, HAN Min-xiao¹, HUANG Yong-ning², ZHANG Han-hua²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co. Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: The stability problem caused by a large scale wind farm connected is becoming increasingly serious, but little research focuses on building a general impedance model of double fed induction generator(DFIG) in order to quantitatively analyze each system parameters in stability. The general impedance model in synchronous frame is given with the parts of wind generator, outlet filter, the transformer, the inner and outer loop and phase-locked loop (PLL) in both rotor-side controller(RSC) and grid-side controller(GSC) as well as the DC part between them. Using the actual parameters in Ningxia Mahuangshan wind farm, the simulation model is built. By comparing the impedance characteristic curve of the partially impedance model with that of the general one, the necessity of considering PLL and DC part is proved. By applying the generalized Nyquist stability criterion in analyzing each system parameters, the results verify that the RSC parameters, DC outer loop parameter in GSC and line inductance have obvious effect on system stability. Finally, it is verified by the simulation in PSCAD.

Key words: double fed induction generator; stability analysis; impedance model; impedance-frequency characteristics; generalized Nyquist stability criterion