

风电场内机群间次同步振荡相互作用

徐衍会, 滕先浩

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:大型风电场内部包含大量控制参数各异、运行状态不同甚至类型多样的风电机组,其并网引发的次同步振荡问题日益凸显。研究了风电场内部不同风电机组之间次同步振荡相互作用及其影响因素,从而明确次同步振荡在风电场内的演化过程;建立了直驱风电场的并网导纳模型;应用广义奈奎斯特判据分析了风电场内部不同风电机组并网的次同步振荡稳定性,在此基础上研究了风电场内部不同风电机组之间的次同步振荡相互作用。结果表明,“振荡机群”能够引起“稳定机群”也发生次同步振荡,二者的并网机组台数比例对风电场次同步振荡特性具有显著的影响,“振荡机群”的锁相环参数对整座风电场的次同步振荡频率具有重要的影响。在MATLAB/Simulink中搭建了直驱风电场的并网仿真模型,时域仿真结果验证了上述理论分析的正确性。

关键词:风电场;风电机组;次同步振荡;相互作用;导纳模型;广义奈奎斯特判据

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008019

0 引言

近年来,随着以风能为代表的清洁能源大量接入,其引发的次同步振荡SSO(Sub-Synchronous Oscillation)问题严重威胁着电力系统的安全、稳定运行。2009年首次报道了美国德州的风电场与输电网络相互作用引发SSO事件。2011年以来,我国华北地区也发生多次类似的次同步谐振。而2015年7月1日,新疆哈密地区某大型直驱风电场发生持续的次同步频率功率振荡,引起临近汽轮机组的扭振保护动作,导致切机事故发生^[1]。

分析SSO采用的方法通常有基于电磁模型的时域仿真方法^[2-3]、基于状态空间模型的特征分析方法^[4-5]。时域仿真方法虽然可以考虑系统元件的非线性,但其缺点主要在于仅能给出时域波形,难以对振荡的机理进行分析。当采用状态空间方法进行稳定性分析时,需要获取整个系统的全部参数,才能建立统一的系统状态空间模型。在分析系统稳定性时,状态空间方法依赖于系统的完整性和确定性,这使得对系统的分析变得繁琐复杂。实际风电并网系统中,SSO的发生往往是因为系统存在负阻尼效应,发散的电气量导致变流器的控制信号达到限幅,进而形成非线性持续或高幅值振荡。因此,可采用小信号阻抗模型及其频率特性来分析SSO的起始阶段^[6-7]。

目前,基于阻抗或导纳模型的分析方法已经成为解决SSO问题的常用方法^[8-9]。该方法在研究风

电机组与电网交互系统的阻抗稳定性时,将两者视为源子系统和负载子系统这2个独立的子系统^[10]。基于小扰动模型的阻抗方法能够分析装置端口的阻抗频率特性,物理概念清晰,适用于电力电子装置并网谐波稳定性分析。文献[11]建立了直驱风电端口的输入导纳模型,分析了电流内环比例系数、直流电压外环等控制参数及接入系统强弱对单机次同步频率范围内负电导的影响。文献[12]建立了直驱风电场接入交流电网的等值系统模型,通过阻抗模型分析研究了SSO的产生机理,分析了风电机组外环控制参数、接入交流电网的强弱及动态无功补偿设备对单机SSO特性的影响。

实际上,风电场中存在大量类型多样、控制参数各异、数量不等的风电机群,且运行方式也各不相同。文献[13]利用网络无源性理论分析了直驱风电机组发生SSO的机理及其并网稳定性,通过评估输入导纳的无源性分析控制器参数、电网强度等因素对风电机组耗散性的影响,但采用的是多台具有相同控制参数且类型相同的风电机组来等效整座风电场。文献[14]将3台双馈风电机组直接并联于同一条母线上,建立了多机模型,但是没有研究各类风电机组的控制参数、台数占比等因素变化对整个系统次同步谐振的影响。目前的研究成果大多是针对简单系统实现的,利用聚合模型来等效整座风电场,采用风电场的单机等值模型进行机理分析^[2,15-16],但是均未涉及在同一风电场内不同风电机组的相互影响研究。

本文基于直驱风电机组的导纳模型分析了风电场内不同风电机组的相互影响。利用广义奈奎斯特判据分析了风电机组导纳模型和电网阻抗模型交互的稳定性,研究了在风电场内不同风电机组发生

收稿日期:2020-02-24;修回日期:2020-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677066)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677066)

SSO的相互影响。同时研究了锁相环PLL(Phase Locked Loop)参数和风电机组台数对风电场内部SSO的影响。最后基于MATLAB/Simulink建立了含有不同风电机组的直驱风电场并网仿真模型,时域仿真结果验证了理论模型的有效性。

1 多直驱风电机组并网模型

直驱风电机组主要由风力机、永磁同步发电机PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)、换流器和滤波器等组成。直驱风电机组的机侧换流器MSC(Machine-Side Converter)和网侧换流器GSC(Grid-Side Converter)均为 dq 解耦控制。直驱风电机组并网引起的SSO主要与GSC有关^[12]。风电机组的转动惯性大,MSC的输出功率基本恒定,GSC的控制实现直流电容两端电压稳定,风电并网逆变器采用电流控制,体现为电流源特性,因此可以将风力机、PMSG及MSC等效为受控电流源^[7,16-17],通过调节电流源的大小可以控制风电机组的输出功率。直驱风电机组的主电路及其控制系统如图1所示。

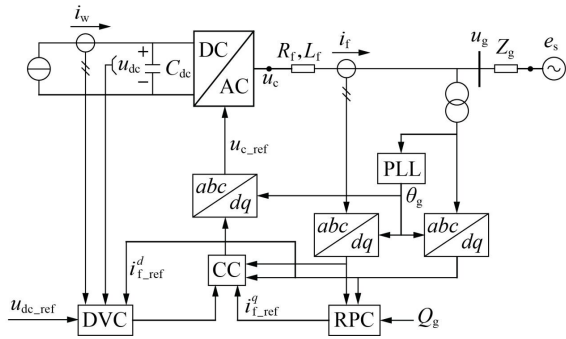


图1 直驱风电机组的主电路及其控制系统

Fig.1 Main circuit of PMSG wind turbine generator and its control system

图1中, i_w 为MSC输出电流; $u_{dc,ref}$ 为直流母线参考电压; $u_{c,ref}$ 为电流控制器CC(Current Controller)输出的参考电压; θ_g 为PLL量测旋转角度; u_g 为公共连接点PCC(Point of Common Coupling)处的电压; u_c 为GSC的输出电压; $i_{f,ref}^d$ 、 $i_{f,ref}^q$ 分别为流经滤波器的参考电流的 d 、 q 轴分量; Q_g 为无功功率参考值; L_f 、 R_f 分别为滤波器的等值电感、等值电阻; C_{dc} 为直流电容; u_{dc} 为直流电容两端电压; e_s 、 Z_g 分别为系统所连接的无穷大电网的等效电压、等效网络阻抗^[18]。控制系统主要包括电流控制器、直流电压控制器DVC(Direct Voltage Controller)、无功功率控制器RPC(Reactive Power Controller)、PLL这4个部分。

GSC控制框图如图2所示,作为离散时间控制器,由于离散化和计算时间的关系,系统会受到时延的影响。考虑到时间延迟,存在 $u_c^{dq} = H_d u_{c,ref}^{dq}$,其中 $H_d = e^{-sT_d}$, T_d 为时间延迟。

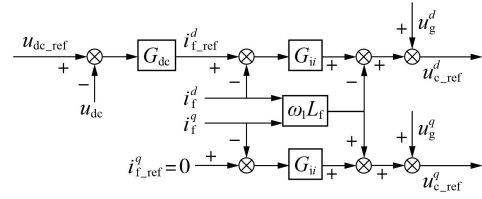


图2 GSC控制框图

Fig.2 Control block diagram of GSC

1.1 主电路模型

图2中GSC的控制结构包括内环电流控制器和外环直流电压控制器,电流控制器输出的参考电压 $u_{c,ref}^{dq}$ 可表示为:

$$u_{c,ref}^{dq} = u_g^{dq} + j\omega_1 L_f i_{f,ref}^{dq} + G_{ii} (i_{f,ref}^{dq} - i_f^{dq}) \quad (1)$$

其中, ω_1 为额定角频率; $G_{ii} = K_{pi} + K_{ii}/s$ 为传递函数, K_{pi} 、 K_{ii} 分别为内环电流控制器的比例、积分系数。根据图1可以推导得到 u_c^{dq} 和 u_g^{dq} 之间的关系为^[19]:

$$u_c^{dq} = (R_f + sL_f) i_f^{dq} + u_g^{dq} \quad (2)$$

在 dq 坐标系下,电流控制器的动态公式可以表示为:

$$i_f^{dq} = G_{c,mat} i_{f,ref}^{dq} + Y_{i,mat} u_g^{dq} \quad (3)$$

其中, $G_{c,mat}$ 为从参考电流到实际电流的传递矩阵, $Y_{i,mat}$ 为输入导纳矩阵,如式(4)所示。

$$G_{c,mat} = \frac{G_{ii} H_d \begin{bmatrix} sL_f + R_f + G_{ii} H_d & \omega_1 L_f (1 - H_d) \\ -\omega_1 L_f (1 - H_d) & sL_f + R_f + G_{ii} H_d \end{bmatrix}}{(sL_f + R_f + G_{ii} H_d)^2 + [\omega_1 L_f (1 - H_d)]^2} \quad (4)$$

$$Y_{i,mat} = \frac{(H_d - 1) \begin{bmatrix} sL_f + R_f + G_{ii} H_d & \omega_1 L_f (1 - H_d) \\ -\omega_1 L_f (1 - H_d) & sL_f + R_f + G_{ii} H_d \end{bmatrix}}{(sL_f + R_f + G_{ii} H_d)^2 + [\omega_1 L_f (1 - H_d)]^2}$$

考虑到外环控制器和PLL的影响,式(3)需要进一步修正。目前,大多外环控制器一般都省略无功功率控制,直接将无功电流 $i_{f,ref}^q$ 默认为0输入内环电流控制器,即 $i_{f,ref}^q = 0$ 。在直流电压控制器中,有功电流参考分量可以表示为:

$$i_{f,ref}^d = G_{dc} (u_{dc,ref} - u_{dc}) \quad (5)$$

其中, $G_{dc} = K_{pdc} + K_{idc}/s$, K_{pdc} 、 K_{idc} 分别为外环直流电压控制器的比例、积分系数。忽略换流器的损耗,且电流内环控制回路比直流控制回路快得多^[13]。假定直流侧注入功率恒定,则在小信号电压扰动注入时有:

$$C_{dc} u_{dc0} d\Delta u_{dc} / dt = -\Delta P_c \quad (6)$$

其中, ΔP_c 为风电机组输出功率的变化量; u_{dc0} 为稳态时的直流母线电压; Δu_{dc} 为直流侧电压扰动量。

设 u_{c0}^d 、 u_{c0}^q 分别为稳态时GSC出口电压的 d 、 q 轴分量, i_{f0}^d 、 i_{f0}^q 分别为稳态时GSC输出电流的 d 、 q 轴分量,且有 $i_{f0}^q = \Delta i_f^q = 0$,则 ΔP_c 为:

$$\Delta P_c = \frac{3}{2} (\Delta u_c^d i_{f0}^d + u_{c0}^d \Delta i_f^d) \quad (7)$$

其中, Δu_c^d 为电流控制器输出电压变化量的 d 轴分

量; Δi_f^d 为 GSC 输出电流变化量的 d 轴分量。

根据式(2)、(6)、(7)得到 Δu_{dc} 为:

$$\Delta u_{dc} = -\frac{3[(R_f + sL_f)\Delta i_f^d i_{f0}^d + \Delta u_g^d i_{f0}^d + u_{c0}^d \Delta i_f^d]}{2C_{dc} u_{dc0} s} \quad (8)$$

联立式(5)和式(8)得到有功、无功参考电流的小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta i_{f,ref}^{dq} = G_{oc} \Delta i_f^{dq} + Y_{oc} \Delta u_g^{dq} \\ G_{oc} = \begin{bmatrix} \frac{3G_{dc}[(R_f + sL_f)i_{f0}^d + u_{c0}^d]}{2C_{dc} u_{dc0} s} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ Y_{oc} = \begin{bmatrix} 3G_{dc} i_{f0}^d / (2C_{dc} u_{dc0} s) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

其中, G_{oc} 和 Y_{oc} 为传递矩阵。

利用式(3)和式(9)可以求出带有电流控制器和外环控制器的电流动态公式为:

$$\Delta i_f^{dq} = Y_{i,oc} \Delta u_g^{dq} \quad (11)$$

其中, $Y_{i,oc}$ 为修正的导纳矩阵, 如式(12)所示。

$$Y_{i,oc} = \frac{Y_{oc} G_{c,mat} + Y_{i,mat}}{I_2 - G_{oc} G_{c,mat}} \quad (12)$$

其中, I_2 为 2×2 阶的单位矩阵。

1.2 PLL 参数的影响

直驱风电机组的输入导纳是在 dq 旋转坐标系下的, 通过 PLL 量测的同步坐标系下的旋转角度为 θ_{PLL} , 同步旋转角度为 θ_1 , PLL 小扰动为 $\Delta\theta = \theta_{PLL} - \theta_1$ 。对于一般矢量 x (电压或电流), 换流器参考 dq 坐标系和电网 dq 坐标系下对应的矢量关系为:

$$x^{dq} = x_s^{dq} e^{-j\Delta\theta} \quad (13)$$

其中, x^{dq} 为在换流器参考 dq 坐标系下 x 的 dq 轴分量; x_s^{dq} 为在电网 dq 坐标系下 x 的 dq 轴分量。由欧拉公式可知:

$$e^{-j\Delta\theta} = \cos \Delta\theta - j \sin \Delta\theta \approx 1 - j\Delta\theta \quad (14)$$

θ_{PLL} 的线性化小信号模型 $\Delta\theta$ 可以表示为:

$$s\Delta\theta = \Delta\omega = \frac{K_{p,PLL}s + K_{i,PLL}}{s} \Delta u_g^q \quad (15)$$

其中, $K_{p,PLL}$ 、 $K_{i,PLL}$ 分别为 PLL 的比例、积分系数。PLL 控制框图如图 3 所示。

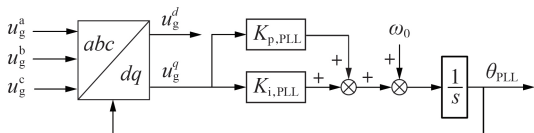


图3 PLL 控制框图

Fig.3 Control block diagram of PLL

根据式(13)和式(14)可以得到:

$$\begin{cases} \Delta u_g^d = \Delta u_{g,s}^d + \Delta\theta u_{g0}^q \\ \Delta u_g^q = \Delta u_{g,s}^q - \Delta\theta u_{g0}^d \end{cases} \quad (16)$$

其中, Δu_g^d 、 Δu_g^q 分别为换流器参考坐标系下 PCC 处输

出电压变化量的 d 、 q 轴分量; $\Delta u_{g,s}^d$ 、 $\Delta u_{g,s}^q$ 分别为电网 dq 轴坐标系下 PCC 处输出电压变化量的 d 、 q 轴分量; u_{g0}^d 、 u_{g0}^q 分别为稳态时 PCC 处出口电压的 d 、 q 轴分量。在定电压控制的 dq 坐标系下, 静态工作点处有 $u_{g0}^q = 0$, 则可得:

$$\begin{cases} \Delta u_g^d = \Delta u_{g,s}^d \\ \Delta u_g^q = \Delta u_{g,s}^q - \Delta\theta u_{g0}^d \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta\theta = \frac{G_{PLL}}{1 + G_{PLL} u_{g0}^d} \Delta u_{g,s}^q = G_{PLL,s} \Delta u_{g,s}^q \quad (18)$$

其中, G_{PLL} 为 PLL 的传递函数, 如式(19)所示。

$$G_{PLL} = (K_{p,PLL} + K_{i,PLL}/s)/s \quad (19)$$

根据式(13)和式(18), 将换流器参考坐标系下的电流和电压转换成电网 dq 坐标系下。考虑到 PLL 的影响, 电流的动态公式为:

$$\Delta i_{f,s}^{dq} = Y_{WT} \Delta u_{g,s}^{dq} \quad (20)$$

其中, Y_{WT} 为直驱风电机组最终的输入导纳矩阵, 如式(21)所示。

$$Y_{WT} = \begin{bmatrix} 0 & -i_{f0}^q G_{PLL,s} \\ 0 & i_{f0}^d G_{PLL,s} \end{bmatrix} + Y_{i,oc} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - u_{g0}^d G_{PLL,s} \end{bmatrix} \quad (21)$$

由式(21)可以看出, PLL 参数影响直驱风电机组的导纳矩阵。

1.3 机群台数的影响

假设风电场中有 m 个具有不同控制参数的风电机组, 群内机组台数分别为 n_1 、 n_2 、 $\dots$ 、 n_m 。风电场由电流源与多个风电机组输入导纳并联组成的诺顿等效电路表示, 风电场的总导纳 Y_F 为 m 个风电机组输入导纳之和, 如式(22)所示。

$$Y_F = n_1 Y_{WT1} + n_2 Y_{WT2} + \dots + n_m Y_{WTm} \quad (22)$$

由式(22)可以看出, 风电场的总导纳 Y_F 与各个机群的机组台数密切相关。

1.4 并网模型稳定性分析

图 1 的简化系统的小信号阻抗示意图如图 4 所示。图中, Z_g 为电网侧输入阻抗矩阵; I_f 为风电场并网电流; I_{eq} 为等效受控电流源电流; E_{eq} 为无穷大电网的等效电压。

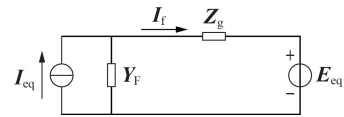


图4 并网系统的小信号阻抗示意图

Fig.4 Schematic diagram of small-signal impedance of grid-connected system

由图 4 可得风电场并网电流 I_f 为:

$$I_f = (I_2 + Y_F(s) Z_g(s))^{-1} (I_{eq} - E_{eq} Y_F(s)) \quad (23)$$

$$Z_g = \begin{bmatrix} R_g + sL_g & -\omega_1 L_g \\ \omega_1 L_g & R_g + sL_g \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中, R_g 、 L_g 分别为电网侧电阻和电感。由式(23)可

知,并网系统的小扰动稳定性取决于回率矩阵 $L(s) = Y_F(s)Z_g(s)$ 的奈奎斯特曲线,回率矩阵 $L(s)$ 是 2×2 阶的矩阵,因此其在任意频率处存在 2 个特征值 $\lambda_1(s)$ 、 $\lambda_2(s)$ 。由广义奈奎斯特判据可以知道^[20],当且仅当回率矩阵 $L(s)$ 的 2 条特征轨迹在 s 平面上环绕点 $(-1,0)$ 的次数,与风电场导纳矩阵 $Y_F(s)$ 和电网侧输入阻抗矩阵 $Z_g(s)$ 在右半平面的极点总数相等时,三相交流系统是稳定的。当风电机组子系统和电网子系统单独运行时是稳定的,即风电场导纳矩阵 $Y_F(s)$ 和电网侧输入阻抗矩阵 $Z_g(s)$ 不存在位于右半平面的极点,因此,可以认为点 $(-1,0)$ 被广义奈奎斯特曲线包围是风电机组并网系统发生 SSO 失稳的判据。

2 直驱风电场内部不同风电机组的相互影响

2.1 双机等值并网模型

风电场中存在大量类型多样、控制参数各异、机组数量不等的风电机群,且运行方式也各不相同。为了分析问题的方便,假设风电场内存在 2 种具有不同参数的直驱风电机组群,等值风电机组群 1 (WTs1)、等值风电机组群 2 (WTs2) 的导纳矩阵分别为 Y_{WT1} 、 Y_{WT2} ,风电机组台数分别为 n_1 、 n_2 ,主要参数见附录 A 中表 A1。当等值风电机组群在 3 种运行方式(运行方式 1 为 WTs1 单独并网,运行方式 2 为 WTs2 单独并网,运行方式 3 为 WTs1 与 WTs2 同时并网)下并网运行时,其等值导纳矩阵为:

$$Y_F = \begin{cases} n_1 Y_{WT1} & \text{运行方式 1} \\ n_2 Y_{WT2} & \text{运行方式 2} \\ n_1 Y_{WT1} + n_2 Y_{WT2} & \text{运行方式 3} \end{cases} \quad (25)$$

2.2 基于广义奈奎斯特判据分析 SSO 的相互作用

等值风电机组群单独并网时的广义奈奎斯特曲线见图 5。由图 5(a)可以看出,当 WTs1 单独并网时,回率矩阵 $L(s)$ 的广义奈奎斯特曲线没有包围点 $(-1,0)$,风电机组没有发生 SSO 的风险;由图 5(b)

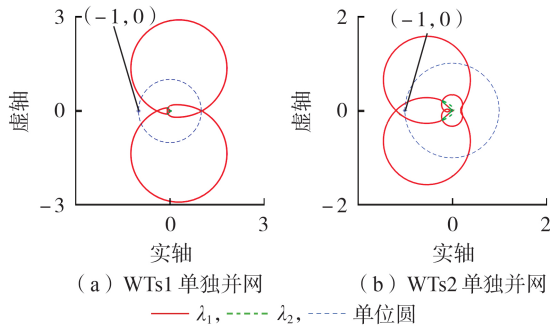


图5 等值风电集群单独并网时的广义奈奎斯特曲线

Fig.5 Generalized Nyquist curves when equivalent wind power clusters connect to power grid separately

可以看出,当 WTs2 单独并网时,回率矩阵 $L(s)$ 的广义奈奎斯特曲线包围了点 $(-1,0)$,风电机组有发生 SSO 的风险。WTs1 的参数设置合理,其单独并网可以稳定输出功率,因此将 WTs1 命名为“稳定机群”; WTs2 的参数设置不合理,其单独并网时会发生 SSO,因此将 WTs2 命名为“振荡机群”。

WTs1 与 WTs2 并联并网时的广义奈奎斯特曲线见图 6。由图 6 可知,当 WTs1 与 WTs2 同时并网时,整座风电场有发生 SSO 的风险。由广义奈奎斯特曲线与单位圆的交点可知系统潜在的谐振频率点,谐振频率约为 39.2 Hz。以上分析结果表明,WTs2 发生 SSO 可导致附近的 WTs1 也出现振荡。

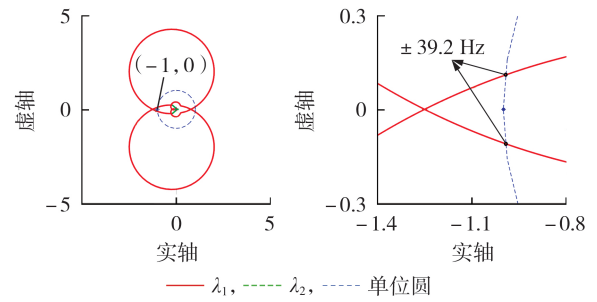


图6 WTs1 与 WTs2 并联并网时的广义奈奎斯特曲线

Fig.6 Generalized Nyquist curves when WTs1 and WTs2 connect to power grid in parallel

3 风电场内部 SSO 时域仿真分析

在 MATLAB / Simulink 中搭建如图 7 所示的直驱风电场并网仿真平台,分析风电场内部机群间 SSO 的相互作用,参数见附录 A 中表 A1。考虑 WTs1 单独并网、WTs2 单独并网、WTs1 与 WTs2 同时并网这 3 种风电场的运行方式。

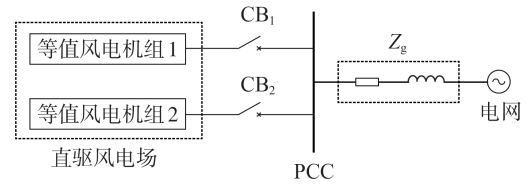


图7 直驱风电场并网仿真模型

Fig.7 Simulation model of grid-connected PMSG wind farm

3.1 风电机组单独并网分析

运行方式 1 下 CB_1 闭合、 CB_2 断开, WTs1 单独并网, WTs1 的 A 相出口电流见附录 B 中图 B1。可见, WTs1 单独并网时系统是稳定的,无 SSO 分量,这与上述理论分析结果一致。

运行方式 2 下 CB_1 断开、 CB_2 闭合, WTs2 单独并网, WTs2 的 A 相出口电流见附录 B 中图 B2。可以看出, WTs2 单独并网时电流的频谱分析中有明显的 SSO 分量,表明 WTs2 的参数设置不合理,在并网的

过程中发生了SSO。

3.2 风电机组间相互作用分析

运行方式3下CB₁、CB₂均闭合,WTs1和WTs2同时并网。WTs1、WTs2及汇集站母线的A相出口电流分别见附录B中图B3、图B4和图8(图中幅值为标么值,后同)。

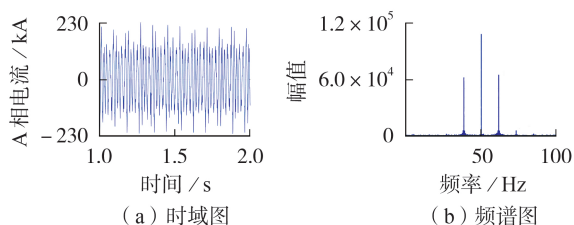


图8 风电场汇集站母线的A相出口电流

Fig.8 Phase-A output current of wind farm gathering station bus

可以看出,原来的“稳定机群”WTs1也发生了SSO,这表明不稳定的“振荡机群”WTs2会引起稳定的WTs1一起发生振荡。这与利用广义奈奎斯特判据对风电场内部SSO相互作用的分析结果是一致的。

4 系统参数对SSO相互作用的影响

4.1 PLL控制器参数

当改变“振荡机群”WTs2的PLL参数,即WTs2的PLL参数为 $K_{p,PLL}=150$ 、 $K_{i,PLL}=20\,000$ 时,风电场汇集站母线A相出口电流如图9所示。

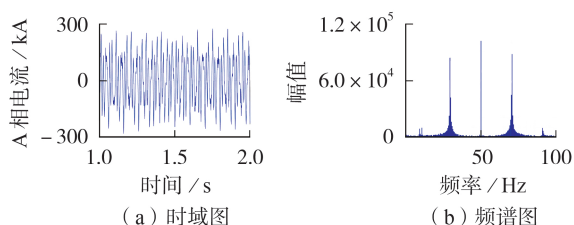


图9 WTs2的PLL参数为 $K_{p,PLL}=150$ 、 $K_{i,PLL}=20\,000$ 时风电场汇集站母线A相出口电流

Fig.9 Phase-A output current of wind farm gathering station bus when PLL parameters of WTs2 are

$K_{p,PLL}=150$ and $K_{i,PLL}=20\,000$

对比图8和图9可知,在只改变WTs2的PLL参数的条件下,WTs1、WTs2及风电场的SSO频率均变为30 Hz左右。由此可以得出,SSO频率与PLL参数密切相关,且“振荡机群”WTs2的振荡频率主导了“稳定机群”WTs1和整座风电场的振荡频率。

4.2 等值风电机组内机组台数比例

单台等值风电机组1和等值风电机组2的控制参数保持不变,改变WTs1与WTs2内机组台数的比例,选择如下3种并联并网运行工况:工况1下WTs1内有190台机组,WTs2内有10台机组;工况2

下WTs1与WTs2内有相同数量的机组;工况3下WTs1内有10台机组,WTs2内有190台机组。上述工况1—3下风电场汇集站母线的A相出口电流分别如图10、图8和图11所示。

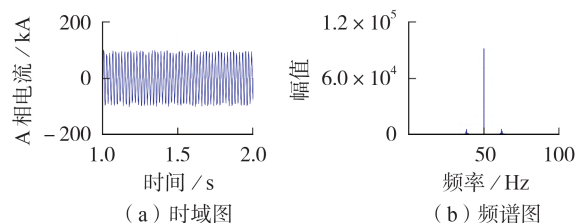


图10 工况1下风电场汇集站母线的A相出口电流

Fig.10 Phase-A output current of wind farm gathering station bus in operating condition 1

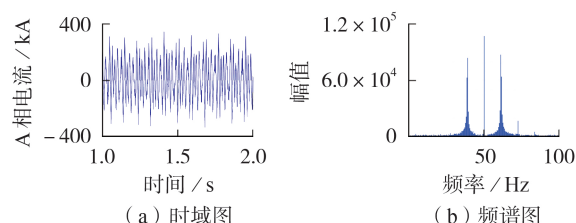


图11 工况3下风电场汇集站母线的A相出口电流

Fig.11 Phase-A output current of wind farm gathering station bus in operating condition 3

可见,当WTs1内机组数量为190台,远大于“振荡机群”WTs2内机组数量10台时,风电场SSO振荡幅度小。图12展示了“稳定机群”WTs1与“振荡机群”WTs2内机组台数之比变化时,风电场汇集站母线的A相出口电流SSO幅值(标么值)的变化趋势。可见,“稳定机群”与“振荡机群”内机组台数之比越大,风电场内部SSO幅值越小。

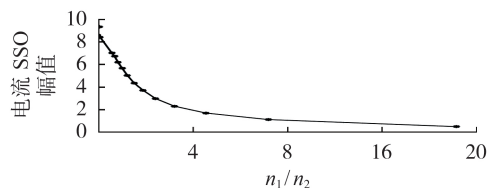


图12 n_1/n_2 变化时SSO幅值

Fig.12 SSO amplitude with variation of n_1/n_2

5 结论

本文建立了直驱风电机组的导纳模型和电网阻抗模型,应用广义奈奎斯特判据分析了风电场内部不同机群间SSO的相互影响。结果表明:“振荡机群”能引起风电场内的“稳定机群”发生同频率的振荡;“振荡机群”的PLL参数对整座风电场的SSO频率有重要影响,PLL的比例、积分系数增大,导致风电场SSO的频率区间增大;“稳定机群”与“振荡机群”机组台数之比增大会导致风电场内部SSO幅值减小。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高澈,牛东晓,罗超,等. 双馈风电场单机与多机等值模型对次同步振荡特性影响的对比[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):152-157.
GAO Che, NIU Dongxiao, LUO Chao, et al. Comparison of impact on sub-synchronous oscillation characteristics between single- and multi-generator equivalent model in DFIG wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 152-157.
- [2] 栗然,卢云,刘会兰,等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术,2013,37(11):3073-3079.
LI Ran, LU Yun, LIU Huilan, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [3] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):188-194,202.
WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 188-194, 202.
- [4] LI Y J, GENG G C, JIANG Q Y. A parallel contour integral method for eigenvalue analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 624-632.
- [5] 明杰,向红吉,戴朝华,等. 多风电场接入的灵敏度场景静态无功/电压评估[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):102-108,115.
MING Jie, XIANG Hongji, DAI Chaohua, et al. Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 102-108, 115.
- [6] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2821-2828.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828.
- [7] 陈新,王赞程,龚春英,等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [8] LIU W, XIE X R, SHAIR J, et al. Frequency-coupled impedance model based subsynchronous oscillation analysis for direct-drive wind turbines connected to a weak AC power system[J]. The Journal of Engineering, 2019(18): 4841-4846.
- [9] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):26-32.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32.
- [10] AMIN M, MOLINAS M. Small-signal stability assessment of power electronics based power systems: a discussion of impedance- and eigenvalue-based methods[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5014-5030.
- [11] 宋瑞华,郭剑波,李柏青,等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4662-4670.
SONG Ruihua, GUO Jianbo, LI Baiqing, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4662-4670.
- [12] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [13] BEZA M, BONGIORNO M. On the risk for subsynchronous control interaction in type 4 based wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1410-1418.
- [14] ATAYDE S, CHANDRA A. Multiple machine representation of DFIG based grid-connected wind farms for SSR studies[C]//IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2011: 1468-1473.
- [15] 高本锋,刘晋,李忍,等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(16):154-161.
GAO Benfeng, LIU Jin, LI Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.
- [16] 张冲,王伟胜,何国庆,等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23):6757-6767.
ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767.
- [17] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [18] 吴汪平,楚皓翔,解大,等. PI控制器参数对并网永磁直驱型风力发电系统机网相互作用的影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):21-28.
WU Wangping, CHU Haoxiang, XIE Da, et al. Influence of PI controllers' parameters on machine-network interaction of grid-connected PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 21-28.
- [19] FAN L L. Modeling type-4 wind in weak grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 853-864.
- [20] SUN J. AC power electronic systems: stability and power quality[C]//2008 11th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Zurich, Switzerland: IEEE, 2008: 1-10.

作者简介:



徐衍会

徐衍会(1978—),男,黑龙江海林人,副教授,博士,通信作者,研究方向为动态电力系统分析与负荷建模(E-mail: xuyanhui23@sohu.com);

滕先浩(1996—),男,辽宁营口人,硕士研究生,研究方向为新能源并网的稳定性分析(E-mail: tengxh7@163.com)。

(编辑 陆丹)

Interaction of sub-synchronous oscillation between wind turbine clusters in wind farm

XU Yanhui, TENG Xianhao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: There are a large number of wind turbines with different control parameters, different operation states and even various types in a large-scale wind farm, and the SSO (Sub-Synchronous Oscillation) problem caused by their grid-connection becomes increasingly prominent. The SSO interaction between different wind turbine clusters in a wind farm and their influential factors are studied, so as to clarify the SSO evolution process in wind farm. The grid-connected admittance model of PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) wind farm is established. The generalized Nyquist criterion is applied to analyze the SSO stability of different grid-connected wind turbine clusters in wind farm. Based on these, the SSO interaction between different wind turbine clusters in wind farm is studied. The results indicate that the “stable wind turbine cluster” also occurs SSO because of the “oscillating wind turbine cluster”. The ratio of their grid-connected wind turbine number has a significant influence on SSO characteristics. The phase locked loop parameters of “oscillating wind turbine cluster” have an impact on SSO frequency of the entire wind farm. The grid-connected simulation model of PMSG wind farm is built in MATLAB/Simulink and the time-domain simulation results verify the correctness of above theoretical analysis.

Key words: wind farms; wind turbines; sub-synchronous oscillation; interaction; admittance model; generalized Nyquist criterion

(上接第49页 continued from page 49)

Analysis of small disturbance stability mechanism for grid-connected voltage source converter

XING Guangzheng¹, WU Chen², CHEN Lei¹, HUANG Wei², CHENG Min², MIN Yong¹, TANG Yong³

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The problem of small disturbance stability for grid-connected vector control-based VSC (Voltage Source Converter) is studied. Based on the detailed model of VSC connected to infinity system, the existence and stability of the equilibrium point are analyzed for different control modes. Different mechanisms of VSC small disturbance instability are summarized. Saddle node bifurcation might cause the loss of equilibrium point and result in instability. This can be illustrated by several mechanisms. The excessive output of current can cause PLL (Phase Locked Loop) losing its equilibrium point, which corresponds to the loss of synchronization of PLL. Meanwhile, the loss of synchronization of PLL may occur individually when the outer loop control is cut off and the inner loop constant current control is used. Additionally, the excessive output of active power may cause the power outer loop losing equilibrium point. When adopting constant reactive power/constant AC voltage control in outer loop that corresponds to the static voltage/power angle instability of power grid. In addition, the increase of current after the instability generally results in the loss of synchronization of PLL. When the equilibrium point exists, the system oscillation mode generally includes low-frequency oscillation mode and subsynchronous oscillation mode. The system may also suffer from Hopf bifurcation, which further results in oscillation instability. The low-frequency oscillation mode is mainly dominated by the outer loop control, while the subsynchronous oscillation mode is dominated by PLL, current loop and line dynamics. The existence of the equilibrium point is generally not affected by VSC control parameters, but only determined by the network parameters and VSC operating conditions, while the stability of balance point is associated with VSC control parameters.

Key words: voltage source converter; phase locked loops; equilibrium point; saddle node bifurcation; Hopf bifurcation; low-frequency oscillation; subsynchronous oscillation

附录 A

表 A1 系统主要参数

Table A1 Main parameters of system

参数		等值风电机群 1	等值风电机群 2
额定功率/MW		1.5×100	1.5×100
额定电压/V		575	575
直流电压参考值 U_{dc_ref}/V		1175	1175
直流侧电容 C_{dc}/mF		1	1
滤波器等效电感 L_f/mH		4.5	8.0
滤波器等效电阻 $R_f/m\Omega$		0.2	0.25
电网侧等效电感 L_g/mH		5	5
电网侧等效电阻 $R_g/m\Omega$		0.5	0.5
电流控制器系数	K_{pi}	5	1
	K_{ii}	20	20
电压控制器系数	K_{pdc}	1	7
	K_{idc}	10	10
锁相环系数	$K_{p,PLL}$	30	50
	$K_{i,PLL}$	120	5000

附录 B

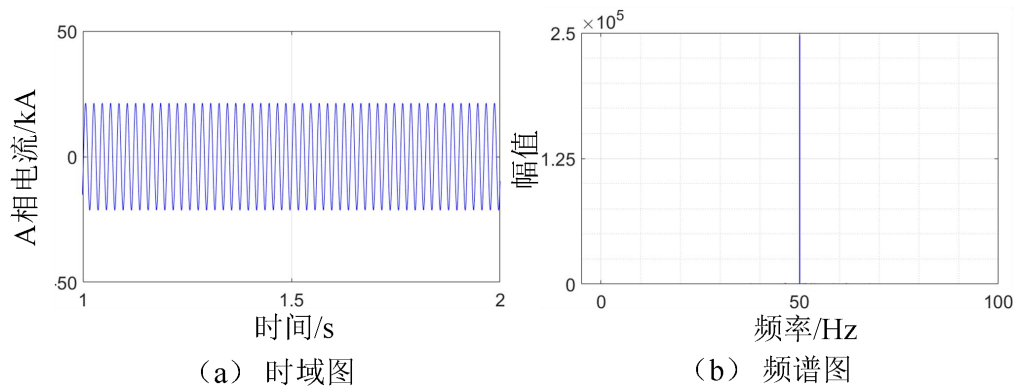


图 B1 运行方式 1 下 WT1 的 A 相出口电流
Fig.B1 Phase-A output current of WT1 under operation mode 1

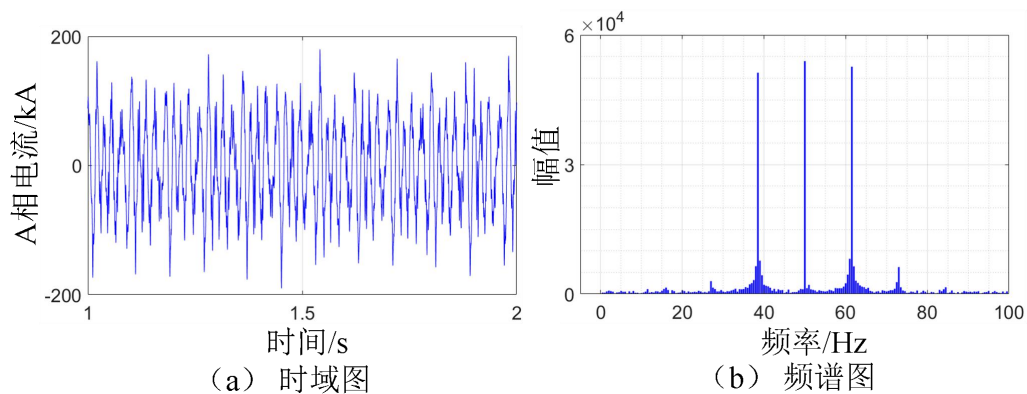


图 B2 运行方式 2 下 WT2 的 A 相出口电流

Fig.B2 Phase-A output current of WT2 under operation mode 2

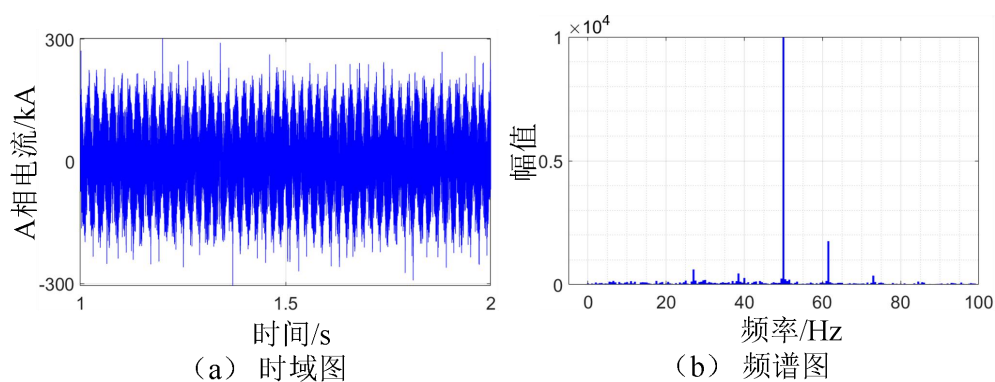


图 B3 运行方式 3 下 WT1 的 A 相出口电流

Fig.B3 Phase-A output current of WT1 under operation mode 3

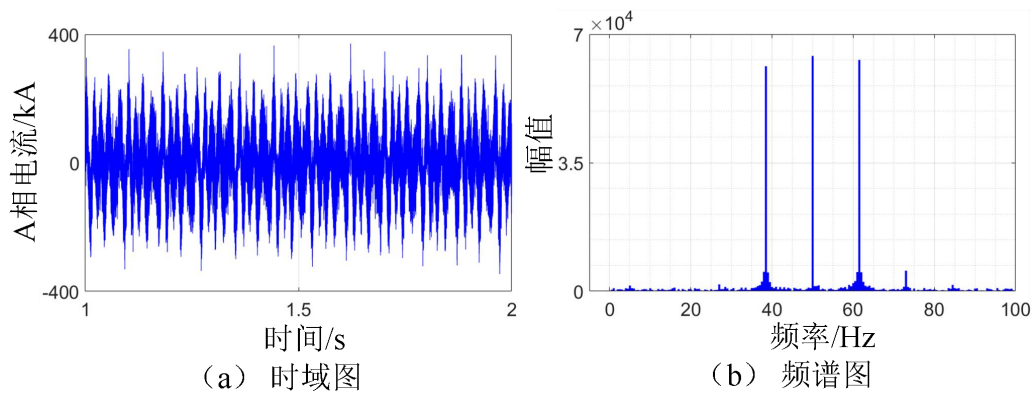


图 B4 运行方式 3 下 WT2 的 A 相出口电流

Fig.B4 Phase-A output current of WT2 under operation mode 3