

电压源型双馈风电机组次同步振荡抑制方法

张澳¹, 代林旺², 马政阳¹, 李少林², 张学广¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国电力科学研究院有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘要: 双馈风电机组在串补电网下易产生次同步振荡, 采用虚拟同步控制结构为电网改善惯量和阻尼的同时也可能导致次同步振荡的风险。针对次同步振荡问题产生的原因, 首先在同步旋转坐标系下建立了采用电压源型虚拟同步机控制的双馈风电机组阻抗模型, 通过广义奈奎斯特判据分析串补度和控制器参数对系统稳定性的影响, 并通过时域仿真结果进行对比验证, 其次提出了一种电压与阻尼协同补偿的控制策略, 根据广义奈奎斯特判据分析附加控制策略前后的稳定性, 并通过时域仿真对该补偿控制方法进行对比验证。结果表明电压与阻尼协同补偿的控制策略可以有效地抑制次同步振荡, 提高系统并网的稳定性。

关键词: 双馈风电机组; 串补电网; 虚拟同步控制; 次同步振荡; 电压补偿; 附加阻尼补偿控制

中图分类号: TM724 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24451

Voltage Source Double-fed Wind Turbine Sub-synchronous Oscillation Suppression Method

ZHANG Ao¹, DAI Linwang², MA Zhengyang¹, LI Shaolin², ZHANG Xueguang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Doubly-fed wind turbine is easy to produce sub-synchronous oscillation in series compensation grid. Using virtual synchronous control structure to improve inertia and damping for grid may also lead to sub-synchronous oscillation risk. In view of the causes of sub-synchronous oscillation, firstly, the double-fed wind turbine impedance model controlled by virtual synchronous machine was established in synchronous rotating coordinate system, and the influence of series compensation and controller parameters on system stability was analyzed by generalized Nyquist criterion, and compared and verified by time domain simulation results. Secondly, a voltage and additional damping cooperative compensation control strategy was proposed, and the stability before and after the additional control strategy was analyzed according to generalized Nyquist criterion, and the compensation control method was compared and verified by time domain simulation. The results show that the cooperative control strategy of voltage and additional damping cooperative compensation can effectively suppress sub-synchronous oscillation and improve the stability of grid-connected system.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); series-compensated grid; virtual synchronous machine control; sub-synchronous oscillation; voltage compensation; additional damping compensation control

随着化石能源的利用, 全球变暖和环境污染问题正逐渐加剧, 因此风能的开发成为目前研究的热点。目前风力发电大多采用双馈风电机组 (doubly-fed induction generator, DFIG), 其控制方

式有两种, 比较成熟的是传统矢量控制方式, 但随着风电在电网中比例的增加, 其无法支撑电网的劣势也逐渐明显^[1]。采用电压源型控制方式可以很好地解决这一问题。在实际应用中, 大多需

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (4000-202114068A-0-0-00)

作者简介: 张澳 (1999—), 男, 硕士, Email: zazoq@outlook.com

通讯作者: 张学广 (1981—), 男, 博士, 教授, Email: zxghit@126.com

要在输电线路中串联补偿电容以提高输电能力,但其可能会导致次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)现象的产生^[2]。因此十分有必要对并网时次同步振荡问题进行分析^[3-4]。

电压源型控制方式主要通过虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略来实现,文献[5]将VSG技术引入到DFIG的转子侧控制中,起到了对电网的频率与电压幅值支撑效果。文献[6]将VSG控制分为两类,一种是直接通过虚拟同步方式获得转子电压 d, q 轴控制信号的直接电压控制方式,另一种为通过虚拟同步方式获得定子电压 d, q 轴信号,再经过电压电流内环得到转子电压 d, q 轴信号的间接电压控制方式。文献[7]对电压电流内环进行了改进,通过引入虚拟阻抗的方式对输出阻抗进行控制,同时将输出功率解耦。文献[8]在虚拟同步控制中引入二阶广义积分器以简化控制结构。

并网时电力电子器件小扰动对电力系统可能会造成稳定性的问题,常用的分析方法有两种,分别为特征值分析法与阻抗分析法。特征值分析法是对系统的状态空间模型计算特征矩阵与特征根,通过分析根轨迹、参与因子和阻尼比来对系统的稳定性进行判断;阻抗分析法不关注系统内部各部分结构,通过外部输入输出特性建立系统频域阻抗模型,根据广义奈奎斯特判据(generalized Nyquist criterion, GNC)分析曲线是否包围 $(-1, j0)$ 点来对稳定性进行分析。对于DFIG系统,通常采用阻抗模型进行分析^[9]。文献[10]建立了DFIG系统的统一阻抗模型,推导出了输出点与并网点阻抗关系。文献[11]建立了考虑控制延时与采样滤波器的负荷虚拟同步机阻抗模型,通过GNC得到了系统在弱电网环境下容易失稳的结论。

针对由于串补电容可能会导致的SSO等问题进行稳定性分析,文献[12]研究了DFIG控制器与次同步谐振电路之间的相互作用,提出了采用陷波器与附加阻尼方式的次同步抑制方法;文献[13]分析了虚拟同步发电机的振荡机理,并虚拟电阻方法提高串补情况下的稳定性;文献[14]提出一种采用避开谐振点、提高电气阻尼的方法对SSO问题进行抑制。

目前很少有文献针对VSG控制下的DFIG系统建立阻抗模型,对其的SSO问题分析也较

少。本文首先建立了在串补条件下的VSG控制DFIG阻抗模型,并对改变控制参数时输出阻抗的变化进行了研究。基于建立的模型通过GNC分析串补度、阻尼系数与惯性时间常数等对系统稳定性的影响,根据导致SSO发生的原因提出了改进方法对振荡加以抑制,最后通过仿真的方式进行分析,验证了控制的可行性与有效性。

1 VSG-DFIG系统阻抗建模

1.1 VSG控制原理

图1为双馈风电机组在串补电网下虚拟同步机控制结构图。

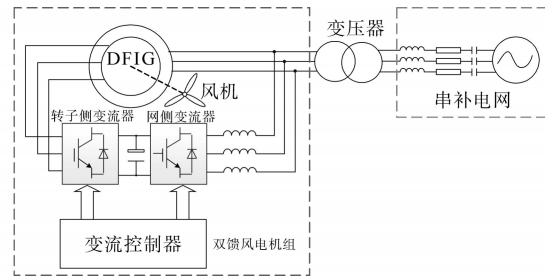


图1 双馈风电机组经串补补偿电网并网系统结构图

Fig.1 Structure diagram of grid-connected system of DFIG via series-compensated grid

图2为虚拟同步控制结构框图,通过对有功功率进行控制可以得到电网的虚拟同步角频率,对无功功率进行控制可以得到转子电压的幅值,将二者进行矢量合成便得到了转子电压信号。

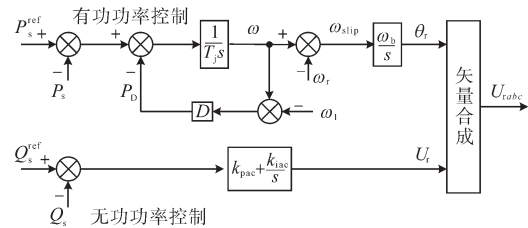


图2 转子侧虚拟同步机控制结构图

Fig.2 Structure diagram of the rotor-side VSG control

图2中, P_s^{ref} 、 Q_s^{ref} 、 P_s 和 Q_s 分别为双馈风电机组定子输出有功、无功功率的给定值和实际值; T_j 和 D 分别为惯性时间常数和阻尼系数; ω_r 为转子转速; ω 为虚拟角速度; ω_{slip} 为滑差角速度; ω_b 为额定角速度; θ_r 为转子控制电压的相角; U_r 为转子控制电压的幅值; k_{pac} 和 k_{iac} 为无功功率控制的PI系数。

有功功率控制是通过传统同步发电机的转子运动方程得来的。

有功功率控制方程为

$$\begin{cases} T_j \frac{d\omega}{dt} = P_s^{\text{ref}} - P_s - D(\omega - \omega_1) \\ \omega_{\text{slip}} = \omega - \omega_r \\ \theta_r = \int \omega_{\text{slip}} dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_1 为电网角频率。

无功功率控制方程为

$$U_r = k_{\text{pac}}(Q_s^{\text{ref}} - Q_s) + k_{\text{iac}} \int (Q_s^{\text{ref}} - Q_s) \quad (2)$$

1.2 串补电网下阻抗建模

在串补电网下建模时,需要考虑等效电阻 R_g 、等效电感 L_g 和串补电容 C_g 。根据线路关系可以得到系统三相静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_g + pL_g & & \\ & R_g + pL_g & \\ & & R_g + pL_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} pC_g & & \\ & pC_g & \\ & & pC_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: e_a, e_b, e_c 为无穷大电网电压; u_a, u_b, u_c 为并网点电压; i_a, i_b, i_c 为并网点电流; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为串联补偿电容上的电压降落; p 为微分算子。

为简化分析,忽略电机内部的各种非理想因素。在 d, q 轴下得到双馈发电机的数学模型为

$$\begin{cases} u_{sd} = p\Psi_{sd} - \omega_1\Psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ u_{sq} = p\Psi_{sq} + \omega_1\Psi_{sd} + R_s i_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = p\Psi_{rd} - \omega_2\Psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = p\Psi_{rq} + \omega_2\Psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \Psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_s, i_s, Ψ_s, L_s 和 R_s 分别为定子电压、电流、磁链、电感和电阻; u_r, i_r, Ψ_r, L_r 和 R_r 分别为转子电压、电流、磁链、电感和电阻; L_m 为定转子互感; d, q 分别为 $d-q$ 坐标系下物理量的 d, q 轴分量; ω_2 为转子电量的角频率。

由于同步旋转坐标系下双馈风机的输出阻抗模型已经研究较为充分^[15],本文不再赘述。为了便于模型的推导,本文做了以下规定:在同步旋转坐标系下, $\mathbf{x} = [x_d \ x_q]^T$, $\mathbf{x} \in \{u_s, u_r, i_s, i_r\}$, $\mathbf{x}$ 为各物理量的瞬时值。系统稳定后注入小信号扰动,可以得到如下的公式:

$$\mathbf{x} = \mathbf{X} + \tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{X}_d \ \mathbf{X}_q]^T + [\tilde{\mathbf{x}}_d \ \tilde{\mathbf{x}}_q]^T \quad (8)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为各相应物理量的稳态值; $\tilde{\mathbf{x}}$ 为各物理量的扰动值。

可得双馈电机开环输出阻抗^[15]为

$$\mathbf{Z}_{\text{op}} = \frac{\mathbf{G}_{zs} \mathbf{G}_{zr} - \mathbf{G}_{zms} \mathbf{G}_{zmr}}{\mathbf{G}_{zr}} \quad (9)$$

其中

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

根据虚拟同步控制方程原理可得到矢量合成的励磁电压方程为

$$U_{\text{rabc}} = \frac{2}{3} (U_{ra} + e^{j\frac{2}{3}\pi} U_{rb} + e^{j\frac{4}{3}\pi} U_{rc}) \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} U_{ra} = U_r \cos(\theta_r) \\ U_{rb} = U_r \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ U_{rc} = U_r \cos(\theta_r - \frac{4}{3}\pi) \end{cases}$$

有功和无功功率的表达式为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = -\frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (11)$$

本文对虚拟同步机控制策略的模拟主要通过有功和无功功率控制实现,因此先对功率表达式进行小信号化。稳态时注入扰动并化简可以得到定子有无功功率的小信号模型:

$$\begin{bmatrix} \tilde{P}_s & \tilde{Q}_s \end{bmatrix}^T = \mathbf{G}_{\text{pq}}^v \tilde{\mathbf{u}}_s + \mathbf{G}_{\text{pq}}^i \tilde{\mathbf{i}}_s \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\text{pq}}^i = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_{sd} & U_{sq} \\ U_{sq} & -U_{sd} \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}_{\text{pq}}^v = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} I_{sd} & I_{sq} \\ -I_{sq} & I_{sd} \end{bmatrix} \end{cases}$$

将有无功功率的扰动量作为输入,将转子电压的幅值与相角的扰动量作为输出,对控制环节进行转换,可以求取虚拟同步控制部分的小信号表达式为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta}_r & \tilde{U}_r \end{bmatrix}^T = -\mathbf{G}_{\text{pq}} \begin{bmatrix} \tilde{P}_s & \tilde{Q}_s \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

其中

$$\mathbf{G}_{pq} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b}{s(T_j s + D)} & 0 \\ 0 & k_{pac} + \frac{k_{iac}}{s} \end{bmatrix}$$

将矢量合成得到的转子励磁电压转换到同步旋转坐标系得:

$$\begin{cases} u_{rd} = U_r \cos \theta_r \\ u_{rq} = U_r \sin \theta_r \end{cases} \quad (14)$$

对其小信号线性化可得其线性化方程为

$$\tilde{\mathbf{u}}_r = \mathbf{G}_{ur} [\tilde{\theta}_r \quad \tilde{U}_r]^T \quad (15)$$

其中

$$\mathbf{G}_{ur} = \begin{bmatrix} -U_{r0} \sin \theta_{r0} & \cos \theta_{r0} \\ U_{r0} \cos \theta_{r0} & \sin \theta_{r0} \end{bmatrix}$$

式中: U_{r0} 与 θ_{r0} 分别为转子电压幅值与相位的稳态值。

如果考虑控制系统的延时,则延时传递矩阵 $\mathbf{G}_{de}$ 可以表示为

$$\mathbf{G}_{de} = \begin{bmatrix} \frac{1 - T_d s}{1 + T_d s} & 0 \\ 0 & \frac{1 - T_d s}{1 + T_d s} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中

$$T_d = 1/f_s$$

式中: f_s 为开关频率。

最后得到虚拟同步机控制的DFIG阻抗模型如下:

$$\mathbf{Z}_{cl} = \frac{\mathbf{G}_{zs} \mathbf{G}_{zr} - \mathbf{G}_{zms} \mathbf{G}_{zmr} - \mathbf{G}_{pq}^i \mathbf{G}_{pq} \mathbf{G}_{ur} \mathbf{G}_{de} \mathbf{G}_{zms}}{\mathbf{G}_{zr} + \mathbf{G}_{pq}^v \mathbf{G}_{pq} \mathbf{G}_{ur} \mathbf{G}_{de} \mathbf{G}_{zms}}$$

1.3 双馈风电机组阻抗特性分析

图3为DFIG对应开环与闭环控制下的输出阻抗波德图,开环控制阻抗 $\mathbf{Z}_{op}$ 用虚线表示,闭环控制阻抗 $\mathbf{Z}_{cl}$ 用实线表示。其中 dd, dq 分量分别为并网点 d 轴电压扰动与 d, q 轴电流扰动的比值; qd, qq 分量分别为并网点 q 轴电压扰动与 d, q 轴电流扰动的比值。

由图3可知,当不考虑系统的内部各控制结构时,DFIG开环阻抗中 dd 与 qq 分量的幅值与相位均相等,而 dq 与 qd 分量的幅值虽然相等,但相位相差 180° 。因为DFIG本质上是感应电机,因此开环阻抗 $\mathbf{Z}_{op}$ 对外表现为感性。对于考虑电压源型VSG控制时的闭环阻抗 $\mathbf{Z}_{cl}$,DFIG在低频段与开环阻抗 $\mathbf{Z}_{op}$ 有较大的差异,而在高频段同样表现出感性。

综上所述,电压源型VSG控制下DFIG的系统参数会很大程度影响系统的输出阻抗特性,结

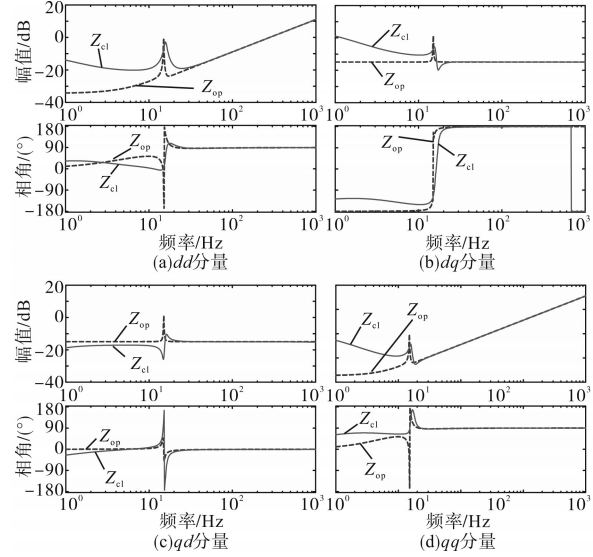


图3 双馈风电机组输出阻抗波德图

Fig.3 Output impedance bode diagram of DFIG

果表明VSG控制参数主要对闭环输出阻抗的低频段起主要影响作用,对高频段的影响基本可忽略不计。建立的阻抗模型为后文对系统进行的稳定性分析打下了理论基础。

2 串补电网下VSG控制的双馈风电机组稳定性分析

进行稳定性分析时所采用的双馈电机以及电网的各项参数设置如下:DFIG额定电压 $V_B = 690$ V,DFIG基准容量 $S_B = 2.1$ MV·A,额定频率 $f_B = 50$ Hz,转子漏感 $L_{lr} = 0.515$ 2(标么值),定子漏感 $L_{ls} = 0.293$ 8(标么值),转子电阻 $R_r = 0.019$ 4(标么值),定子电阻 $R_s = 0.023$ 8(标么值),励磁电感 $L_M = 14.841$ 1(标么值),直流母线电压 $V_{dc} = 1$ 080 V,电网电感 $L_g = 1.0$ (标么值),电网电阻 $R_g = 0.05$ (标么值),电网电容 $C_g = 6.67$ (标么值),其中电机的功率等级为 2.1 MV·A。采用VSG控制下的各控制器参数设置如下:惯性时间常数 $T_j = 0.22$ s,阻尼系数 $D = 20$,无功环比比例系数 $k_p = 0.01$,无功环积分系数 $k_i = 0.2$ 。

2.1 控制器及电网参数变化时DFIG的稳定性

图4为改变串补度时DFIG系统的Nyquist图。图4a中,系统串补度为20%,此时的特征根轨迹(粗实线)未包围临界点 $(-1, j0)$,说明此时系统处于稳定状态。当增加系统串补度时,根轨迹变化为包围临界点,此时系统失稳。由此可知增大串补度会导致系统失稳。

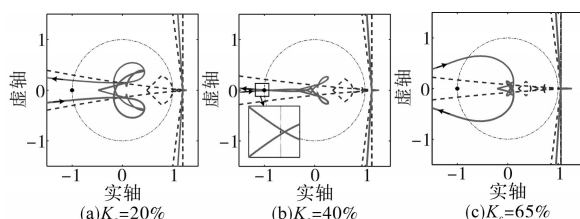


图4 不同串补度下并网双馈风电机组系统Nyquist图

Fig.4 Nyquist diagram of grid-connected DFIG in different compensation levels

同理可以得到其它控制参数的影响如表1所示。

表1 改变各控制参数对系统稳定性的影响

Tab.1 Effect of changing each control parameter on system stability

参数	变化趋势	稳定性
电网串补度	增加	失稳
阻尼系数	减小	失稳
惯性时间常数	减小	失稳
转速	减小	失稳

2.2 串补电网下稳定性分析的仿真验证

搭建仿真模型,验证改变系统串补度时系统稳定性的变化。当系统串补度为40%时,系统处于稳定,在2 s时增加系统串补度至65%,系统出现SSO。图5为系统的三相定子电流与无功功率仿真波形,图6为增加串补度后系统三相定子电流FFT结果,可以看到此时系统振荡频率为29 Hz,处于失稳状态,与理论分析结果一致。

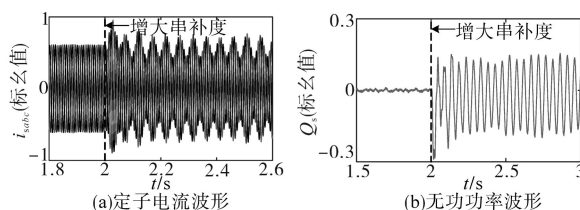


图5 增大串补度后三相定子电流与无功功率仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of three-phase stator current and reactive power after increasing the compensation levels

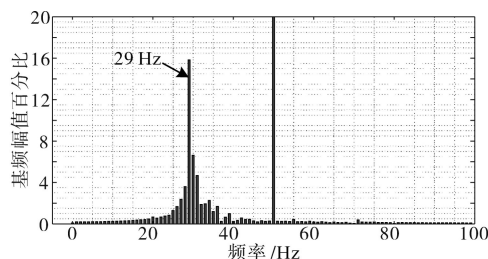


图6 增大电网串补度后双馈风电机组定子电流FFT结果

Fig.6 FFT results of V DFIG stator currents after increasing compensation levels

接下来分析控制参数对SSO的影响。首先分析惯性时间常数,当串补度为40%时,系统稳定运行2 s之后将惯性时间常数由0.22 s减小至0.02 s,此时系统产生SSO,图7分别为定子电流

与有功功率的振荡波形。通过仿真可以分析出当减小惯性时间常数时,DFIG系统会失去稳定,这与通过阻抗分析的理论结果是一致的。

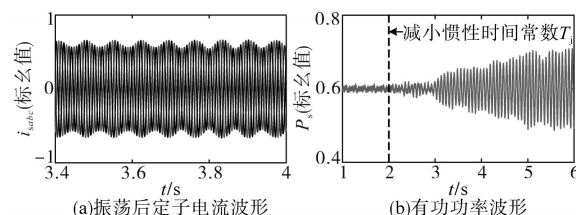


图7 定子电流与有功功率的振荡仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of stator current and active power oscillation

采用相同的方法可以对改变阻尼系数时系统稳定性影响进行分析,同样在串补度为40%、系统稳定运行2 s时将阻尼系数从20减小至3.6,发现DFIG系统出现次同步振荡,图8分别为三相定子电流与有功功率波形,可以看出,当减小阻尼系数时,串补并网系统会与阻抗分析结果一样发生失稳现象。

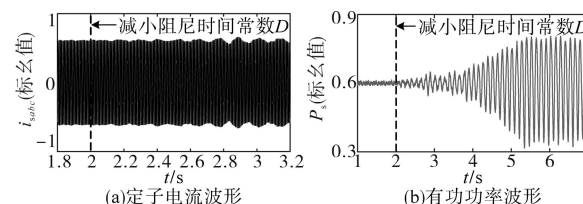


图8 减小阻尼系数后三相定子电流与有功功率仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms of three-phase stator current and reactive power after reducing the damping time constant

3 电压与阻尼协同补偿控制策略

在串补电网下,呈电感特性的DFIG机组与呈电容特性的电网易产生谐振现象。为了抑制SSO的发生,本文提出了一种电压补偿与附加阻尼协同控制策略,控制结构如图9所示,补偿电压采用定子电压经坐标变换后的 d, q 轴分量,经过二阶带通滤波器乘以补偿系数,与矢量合成后的转子电压信号以及附加阻尼输出信号经过代数运算得到转子电压的输出值。

根据图9的附加阻尼控制转子侧电压电流内环控制框图可以得到其数学表达式为

$$\begin{cases} u_{rd}^{\text{ref}} = u_{rd} + QG_{\text{BPF}}(u_{sd}^{\text{ref}} - u_{sd}) - K_d G_{\text{BPF}} i_{rd} \\ u_{rq}^{\text{ref}} = u_{rq} + QG_{\text{BPF}}(u_{sq}^{\text{ref}} - u_{sq}) - K_d G_{\text{BPF}} i_{rq} \end{cases} \quad (17)$$

式中: K_d 为附加阻尼系数; G_{BPF} 为二阶带通滤波器对应的传递函数; Q 为电压补偿系数。

附加阻尼控制中采用了二阶带通滤波器,其作用是对信号中次同步分量进行提取,防止直流量对系统的稳态工作点造成影响。

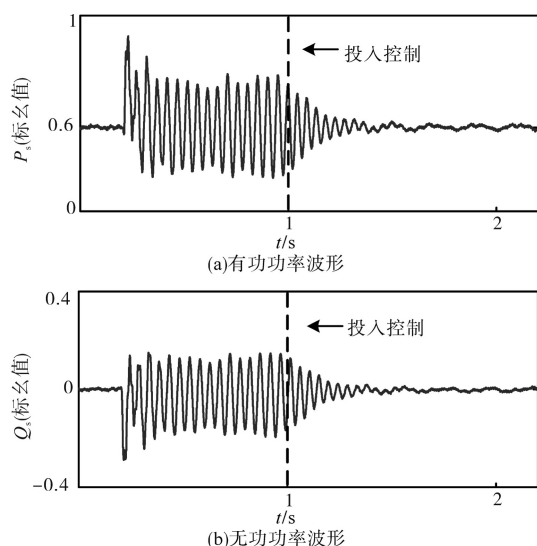


图13 振荡发生一段时间后,有、无控制下有功、无功功率仿真波形

Fig.13 Simulation waveforms of active and reactive power with and without control after the oscillation for some time

5 结论

本文研究了串补情况下DFIG机组的次同步振荡问题,首先对电压源型虚拟同步控制下双馈风电机组进行阻抗建模,对其阻抗特性进行分析,可以看出虚拟同步外环各个参数主要对低频段的阻抗特性产生较大影响,随着串补度的增加、惯性时间常数的减小、阻尼系数的减小,串补条件下的DFIG机组就更易出现次同步振荡。通过引入本文提出的电压与阻尼协同补偿控制策略,可以使输出的有功功率和无功功率波形振荡收敛,并最终趋于稳定,有效地抑制次同步振荡,该方法重点解决了串补电网下虚拟同步控制策略的次同步振荡问题,有效地提高了系统性能。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 尚磊,胡家兵,袁小明,等.电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J].中国电机工程学报,2017,37(2):403-412
Shang Lei, Hu Jiabing, Yuan Xiaoming, *et al.* Modeling and improved control of virtual synchronous generators under sym-

- metrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):403-412.
- [3] 谢震,孟浩,张兴,等.基于定子虚拟阻抗的双馈风电机组虚拟同步控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(9):157-163.
Xie Zhen, Meng Hao, Zhang Xing, *et al.* Virtual synchronous control strategy of DFIG-based wind turbines based on stator virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 157-163.
- [4] Vieto I, Sun J. Sequence impedance modeling and analysis of type-III wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 537-545.
- [5] 张学广,张雅阁,方冉,等.弱电网下双馈风电机组电网电压扰动补偿控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(6):146-159.
Zhang Xueguang, Zhang Yage, Fang Ran, *et al.* Control strategy of disturbance compensation for grid voltage of DFIG based wind turbine in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 146-159.
- [6] 李蕴红,刘芳,刘威,等.VSG-DFIG风力发电系统小信号建模及稳定性分析[J].电源学报,2020,18(2):73-82.
LI Yunhong, LIU Fang, LIU Wei, *et al.* Small-signal modeling and stability analysis of VSG-DFIG wind power generation system[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2):73-82.
- [7] 郭劲东,李云阁,王敏,等.线路模型对仿真分析串补次同步振荡现象的影响分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):174-179.
Guo Jindong, Li Yunge, Wang Min, *et al.* Influence analysis of line models on the simulation analysis of a series complement sub-synchronous oscillation phenomenon[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 174-179.
- [8] Xu G, Zhu L, Pan Z. Virtual synchronous control using SOGI for standalone DFIG-based wind turbines with unbalanced and nonlinear loads[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2018: 1133-1138.
- [9] 严金昊,谢佳锟,姚李孝,等.双馈风力发电机组经串补并网的次同步振荡分析[J].电网与清洁能源,2021,37(5):123-127,133.
Yan Jinhao, Xie Jiakun, Yao Lixiao, *et al.* Subsynchronous oscillation analysis of double-fed wind turbines via series complementary grid connection[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 123-127, 133.
- [10] 王俊茜,贾祺,刘侃,等.混合风电场接入含固定串补系统的次同步振荡特性分析[J].可再生能源,2022,40(5):651-659.
Wang Junqian, Jia Qi, Liu Kan, *et al.* Analysis of subsynchronous oscillation characteristics of hybrid-based wind farm connected with fixed series compensation system[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(5): 651-659.
- [11] 郭健,陈燕东,王翔宇,等.负荷虚拟同步机的宽频带dq阻抗建模及弱电网下与传统PWM整流器的稳定性对比分析[J].

(下转第27页)