

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190421

基于定子侧模拟电阻的双馈风电场次同步振荡抑制策略研究

单碧涵¹, 王宝华^{1,2}, 刘洋¹, 刘硕夫¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 江苏风力发电工程技术中心, 江苏 南京 210023)

摘要: 双馈风电场并网运行时, 容易发生次同步振荡事故。搭建了双馈风电场经串联补偿电容并网的系统模型, 并用 Nyquist 稳定性判据分析了影响双馈风电场次同步振荡的主要因素。在此基础上, 提出了一种基于定子侧模拟电阻的次同步振荡抑制策略, 以增强次同步频带下的电气阻尼。时域仿真结果表明该方法能够有效抑制双馈风电场并网系统中的次同步振荡现象, 提升系统的稳定性。相较于传统的抑制方法, 所提方案无需任何附加装置, 便于工程实际应用。

关键词: 双馈风电场; 并网模型; 次同步振荡; 奈奎斯特稳定判据; 定子模拟电阻

Analysis of a new control strategy based on stator-side virtual resistance to suppress sub-synchronous oscillation in DFIG-based wind farms

SHAN Bihan¹, WANG Baohua^{1,2}, LIU Yang¹, LIU Shuofu¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Jiangsu Wind Power Engineering Technology Center, Nanjing 210023, China)

Abstract: When connected to the grid, sub-synchronous oscillations may occur in the wind farms composed of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG). This paper builds the system model of the DFIG-based wind farms that are connected to the grid via series compensation capacitors, and then analyses the main factors that affect the characteristics of the sub-synchronous oscillations with the Nyquist stability criterion. On this basis, a new control strategy based on stator-side virtual resistance is proposed to suppress the sub-synchronous oscillation by enhancing the electrical damping within the sub-synchronous frequency band. The simulation results in time domain show that this method can effectively suppress the occurrence of sub-synchronous oscillation and improve the stability of the system. Compared with the traditional suppressing method, the new strategy in this paper does not need any additional devices, thus it is favorable for engineering applications.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707096) and Open Fund Project of Jiangsu Wind Power Engineering Technology Center (No. ZK16-03-02).

Key words: DFIG-based wind farm; grid-connected model; sub-synchronous oscillation; Nyquist stability criterion; stator-side virtual resistance

0 引言

随着新能源发电的快速发展, 风力发电在系统中扮演着越来越重要的角色。串联补偿电容能够提高线路输电能力, 在双馈风电场远距离送电中得到广泛应用。但同时该技术也容易引发系统的次同步振荡(SSO)^[1-3]。迄今为止, 国内外已发生多起风电

场次同步振荡事故。2009年, 美国德克萨斯州一风电场由于一条故障线路被切除, 线路的串补度由50%提升到75%, 发生了严重的次同步振荡事故, 转子中的过电流使多数风机的撬棒被损坏。2014年, 新疆一风电场也出现次同步振荡事故, 短时间内导致大量机组脱网^[4-5]。由此可见, 次同步振荡严重威胁了双馈风电场的并网运行安全, 亟需解决。

文献[6-10]建立了双馈风电场的并网模型, 并指出由于DFIG轴系的自然扭振频率很小, 扭振相互作用(TI)在双馈风电场中很难出现, 感应发电机效

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707096); 江苏省风力发电工程技术中心开放基金项目资助(ZK16-03-02)

应(IGE)是引起次同步振荡的主要原因。文献[11-12]介绍了一种新的次同步振荡类型:次同步控制相互作用(SSCI)。文献[13-14]利用频率扫描法分析了风机的并网阻抗与频率的关系,解释了次同步振荡出现的原因。文献[15-17]通过理论分析结合时域仿真结果,说明了风速、线路串补度以及变流器内环控制参数是影响系统次同步特性的主要因素。在次同步振荡的抑制方面,当前研究多专注于借助附加阻尼控制器或者FACTS装置。文献[18]利用静止同步补偿器抑制次同步振荡,仿真验证其具有一定效果,但只对单一工况有效。文献[19-20]采用了附加阻尼控制器,但是其参数整定繁杂,物理概念并不明晰。文献[21]通过在风机转子侧附加控制来抑制次同步振荡,但其效果受到带通滤波器性能的限制。此外,上述抑制措施都需要借助于附加装置,增加了单台风机的成本,不便于工程应用。

本文在 Matlab 中搭建了双馈风电场经串补并网的系统模型,并运用奈奎斯特稳定判据分析了影响次同步振荡的几个主要因素。然后,提出了一种基于定子模拟电阻的方法来抑制次同步振荡,最后通过时域仿真验证该方法具有良好的效果。相比于其他方法,本文提出的方案无需改变双馈风机变流器的基本控制结构,无需任何附加装置,同时规避了繁琐的参数整定,便于工程实际应用。

1 DFIG 风电场建模

以 IEEE 第一标准型为基础,本文搭建的双馈风电场并网系统模型如图 1 所示。其中, X_{lg} 、 X_T 为网侧平波电抗和变压器电抗, R_L 、 X_L 和 X_C 为输电线路的电阻、电抗和串补电容容抗。

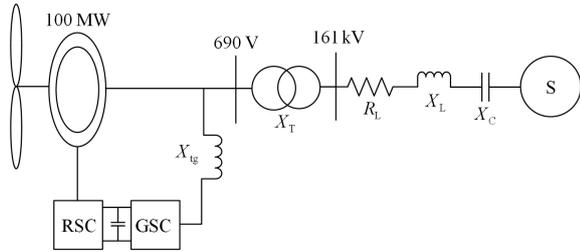


图 1 双馈风电场并网系统模型

Fig. 1 System model of grid-connected DFIG-based wind farm

图中双馈风电场经过升压后,通过串联补偿电容接入无穷大系统。整个系统包括了轴系、感应电机以及变流器等。定子侧采用电动机惯例, dq 坐标系下发电机的电磁关系如式(1)~式(3)所示,其中 ω_1 为同步旋转角速度, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为转差角速度, ω_r 为转子旋转角速度; u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 、 u_{qr} 为定转

子 dq 轴电压; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 为定转子 dq 轴电流; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 为定转子 dq 轴磁链; R_s 、 R_r 为定转子电阻, L_{ls} 、 L_{lr} 为定转子漏感, L_m 为定转子同轴互感, L_s 、 L_r 为定转子绕组等效自感。

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{dr} + i_{ds}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qr} + i_{qs}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (3)$$

双馈风机转子侧变换器的控制目标主要包括:最大风能追踪、保持所发电能频率恒定以及控制无功输出。将定子磁链方向固定在 d 轴,可以实现有功与无功的解耦。本文采用 PI 控制来调节转子电压。转子侧变换器的控制框图如图 2 所示, $T_{e\text{ref}}$ 、 $Q_{s\text{ref}}$ 为电磁转矩和定子无功的参考值, K_{Te} 、 K_{Qs} 、 K_{iq} 、 K_{id} 为内外环 PI 控制的比例系数, T_{Te} 、 T_{Qs} 、 T_{iq} 、 T_{id} 为内外环 PI 控制的积分系数。

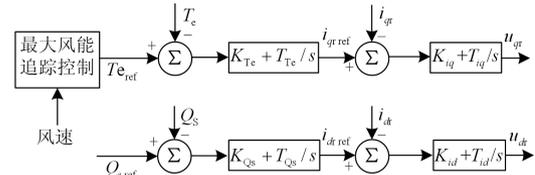


图 2 转子侧变换器控制框图

Fig. 2 Control diagram of the rotor-side converter

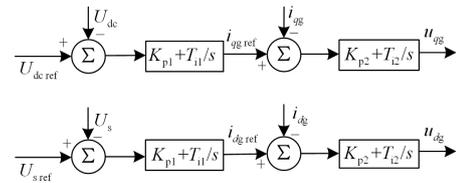


图 3 网侧变换器控制框图

Fig. 3 Control diagram of the grid-side converter

风机通常运行在次同步状态下,网侧变换器的主要功能是实现交流到直流的电能变换。此外,它还能保持直流母线电压恒定以及减少交流侧谐波。网侧变换器的控制框图如图 3 所示, $U_{dc\text{ref}}$ 、 $U_{s\text{ref}}$ 为变换器直流环节和机端电压的参考值, K_{p1} 、 K_{p2} 为内外环 PI 控制的比例系数, T_{i1} 、 T_{i2} 为内外环 PI 控

制的积分系数。

2 双馈风电场次同步稳定性分析

对于特定系统，可以按照所属关系将系统阻抗分为源阻抗 $Z_s(s)$ 和负载阻抗 $Z_{load}(s)$ ，如图 4 所示。

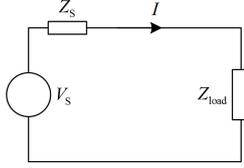


图 4 电源与负载模型

Fig. 4 Model of power supply and load

则系统电流的表达式为

$$I(s) = \frac{V(s)}{Z_{load}(s)} \times \frac{1}{1 + Z_s(s)/Z_{load}(s)} \quad (4)$$

根据 Nyquist 稳定性理论，图 4 所示系统的稳定性可以通过开环频响 $Z_s(s)/Z_{load}(s)$ 的波特图判定。如果其在右半平面有极点，则只有当其曲线逆时针环绕 $(-1,0)$ 点的圈数等于其在右半平面的极点个数时，系统才稳定；如果其在右半平面无极点，则只有当其曲线不环绕 $(-1,0)$ 点时系统才稳定。

文献[22]指出，相较于其他支路，励磁支路和网侧变换器支路阻抗很大，在阻抗模型中通常可以忽略。由转子侧变换器控制框图可得

$$\begin{cases} u_{dr} = K_{id}(i_{dr \text{ ref}} - i_{dr}) + T_{id} \int (i_{dr \text{ ref}} - i_{dr}) dt \\ u_{qr} = K_{iq}(i_{qr \text{ ref}} - i_{qr}) + T_{iq} \int (i_{qr \text{ ref}} - i_{qr}) dt \end{cases} \quad (5)$$

式(5)与式(2)联立有

$$\begin{cases} K_{id} i_{dr \text{ ref}} + T_{id} \int (i_{dr \text{ ref}} - i_{dr}) dt = (R_r + K_{id}) i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ K_{iq} i_{qr \text{ ref}} + T_{iq} \int (i_{qr \text{ ref}} - i_{qr}) dt = (R_r + K_{iq}) i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{令} \begin{cases} u'_{dr} = K_{id} i_{dr \text{ ref}} + T_{id} \int (i_{dr \text{ ref}} - i_{dr}) dt \\ u'_{qr} = K_{iq} i_{qr \text{ ref}} + T_{iq} \int (i_{qr \text{ ref}} - i_{qr}) dt \end{cases}, \text{ 则有} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u'_{dr} = (R_r + K_{id}) i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u'_{qr} = (R_r + K_{iq}) i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases}$$

实际工程中 K_{id} 和 K_{iq} 的取值通常相等，记作 $K_{iq} = K_{id} = K_i$ ，由式(7)可知，转子侧变换器在转子回路中引入了一个值为 K_i 的电阻。将转子绕组中励磁电流的频率折算到定子侧，可得 DFIG 风电场的并网等效阻抗模型如图 5 所示。

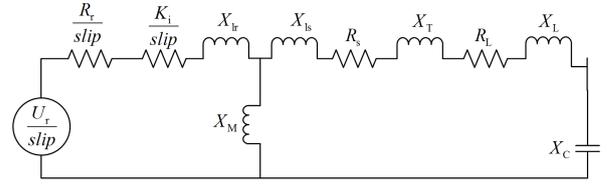


图 5 系统等效阻抗模型

Fig. 5 Equivalent impedance model of the system

图 5 中， $slip = (s - j\omega_r)/s$ 为风机运行时的转差率，由于 X_M 的大小远大于其他阻抗值，因此可忽略 X_M 的影响。串联补偿线路的阻抗为

$$Z_L = R_L + X_L s + X_C s \quad (8)$$

DFIG 的阻抗表达式为

$$Z_{DFIG} = (R_r + K_i)/slip + R_s + (X_{ls} + X_{lr} + X_T)s \quad (9)$$

在次同步振荡分析中， Z_L 属源阻抗， Z_{DFIG} 属负载阻抗，其比值如式(10)所示。式(10)中，有关发电机和线路的参数是固定的，可变量有 X_C 、 ω_r 以及 K_i ，它们分别对应着串补、风速和转子侧变换器内环比例系数。因此，DFIG 风电场并网系统的次同步稳定性主要受这三个因素的影响，下面通过开环响应的 Nyquist 曲线进行稳定性分析。

$$\frac{Z_L}{Z_{DFIG}} = \frac{R_L + X_L s + X_C s}{(R_r + K_i)/slip + R_s + (X_{ls} + X_{lr} + X_T)s} \quad (10)$$

图 6 为风电场风速保持 7 m/s 不变时，不同串补度下的开环频响。由于其在右半平面无极点，因此系统稳定的条件是开环频响的 Nyquist 曲线不包围 $(-1,0)$ 点。由图可知当串补度为 40% 时，曲线不包围 $(-1,0)$ 点，不会发生次同步振荡；当串补度增加到 50% 时，曲线虽未包围 $(-1,0)$ 点，但有向 $(-1,0)$ 点靠近的趋势；而当串补度进一步增加到 70% 时，曲线包围 $(-1,0)$ 点，说明系统变得不稳定。图 7 为线路串补度保持 62.5% 不变而风速变化的情况，从图中可看出当风速为 7 m/s 的时候，曲线包围 $(-1,0)$ 点，系统不稳定；当风速上升到 8 m/s 时，曲线正好经过 $(-1,0)$ 点，系统处于临界稳定状态；当风速为 9 m/s 时，曲线不包围 $(-1,0)$ 点，系统稳定。图 8 为转子侧变换器内环比例系数变化时的开环频响，风速固定为 7 m/s，线路串补度为 30%。从图中可看出当 $K_i = 0.0001$ 时，曲线未包围 $(-1,0)$ 点；当 $K_i = 0.001$ 时，曲线有下移的趋势；而当 $K_i = 0.01$ 时，曲线开始包围 $(-1,0)$ 点，会发生次同步振荡。

由 Nyquist 分析过程可以看出，在 DFIG 风电场并网系统中，风速的降低、线路串补度的增加以及转子侧控制器内环比例系数的增大，都可能导致系统稳定性变差，引起次同步振荡的发生。

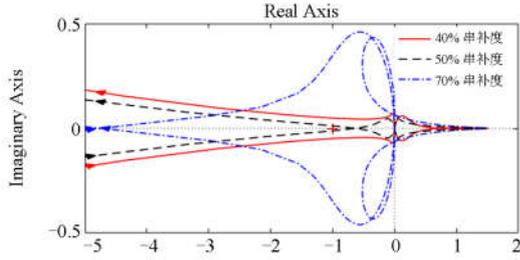


图 6 线路串补度变化时的开环频响

Fig. 6 Open-loop frequency response when series compensation degree changes

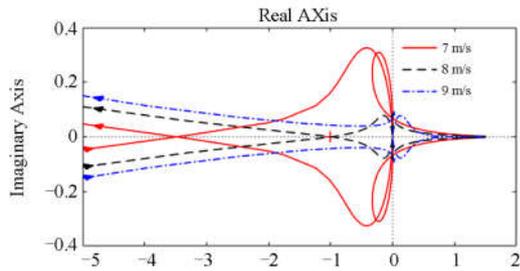


图 7 风速变化时的开环频响

Fig. 7 Open-loop frequency response when wind speed changes

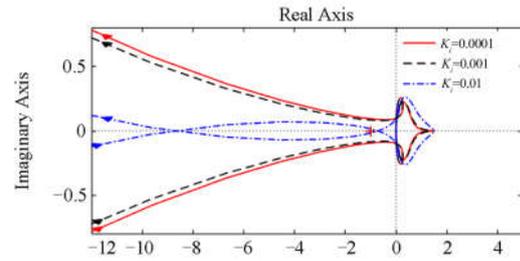


图 8 转子侧内环参数变化时的开环频响

Fig. 8 Open-loop frequency response when the RSC inner coefficient changes

3 双馈风电场次同步振荡抑制

由图 5 可知, 双馈风电场并网系统的电气阻尼受到风机运行转差率的影响。假设系统中出现角频率为 ω_{er} 的次同步振荡分量, 若 $\omega_{er} < \omega_r$, 则对应的转差 $slip = (j\omega_{er} - j\omega_r) / j\omega_{er} < 0$, 转子回路的等效电阻为负值。当负电阻的绝对值大于系统中正电阻的值时, 系统就会对该振荡分量呈现出负阻尼特性, 使振荡幅值持续增大。基于此, 本文提出了一种基于定子侧模拟电阻的次同步振荡抑制方案, 该方案通过改进网侧变换器的控制策略, 以增强次同步频率范围内的电气阻尼, 从而使次同步振荡分量迅速衰减, 提高系统的稳定性。该方案所对应的网侧变

换器控制框图如图 9 所示。图中, i_{qs}^* 、 i_{ds}^* 为依据最大风能跟踪策略所确定的定子电流的稳态期望值。

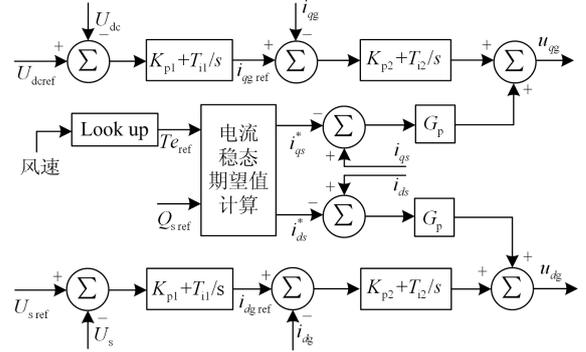


图 9 网侧变换器新控制框图

Fig. 9 New control diagram of GSC

由图 9 可知, 新控制方案在网侧变换器的电压输入端增加了一定的补偿量, 该补偿量也同时作用到定子电压上。补偿后的定子电压满足:

$$\begin{cases} u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} + G_p (i_{qs} - i_{qs}^*) \\ u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} + G_p (i_{ds} - i_{ds}^*) \end{cases} \quad (11)$$

对于系统中的稳态分量, 其电磁关系不变, 仍满足式(1)所示关系。将系统中次同步振荡分量对应的定子电压用 $u_{qs\ sub}$ 和 $u_{ds\ sub}$ 表示, 定子电流用 $i_{qs\ sub}$ 和 $i_{ds\ sub}$ 表示, 定子磁链用 $\psi_{qs\ sub}$ 和 $\psi_{ds\ sub}$ 表示。将式(11)和式(1)作差, 可以得到次同步振荡分量满足的关系如式(12)所示。

$$\begin{cases} u_{qs\ sub} = R_s i_{qs\ sub} + p\psi_{qs\ sub} + \omega_1 \psi_{ds\ sub} + G_p i_{qs\ sub} = \\ (R_s + G_p) i_{qs\ sub} + p\psi_{qs\ sub} + \omega_1 \psi_{ds\ sub} \\ u_{ds\ sub} = R_s i_{ds\ sub} + p\psi_{ds\ sub} - \omega_1 \psi_{qs\ sub} + G_p i_{ds\ sub} = \\ (R_s + G_p) i_{ds\ sub} + p\psi_{ds\ sub} - \omega_1 \psi_{qs\ sub} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得次同步频率范围内定子回路的等效电路如图 10 所示, 其中 Z_0 为原控制方案下定子回路的等效阻抗。对于次同步振荡分量, 原来定子电阻为 R_s , 新控制方案在其基础上增加了值为 G_p 的模拟电阻, 适当调整 G_p 的值就能够抵消次同步频带内转子侧负阻尼的影响, 抑制次同步振荡分量。

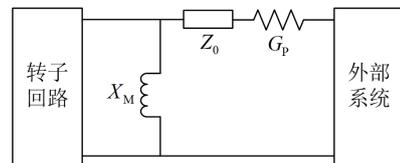


图 10 定子回路等效电路

Fig. 10 Equivalent circuit of stator loop

对于应用新控制策略后的系统，进行特征值模态分析，得到系统的小信号方程为 $d\Delta X/dt = A\Delta X$ 。其中 X 为系统的状态变量， A 为系统的雅可比矩阵。在 7 m/s 风速下，串补度为 70% 时求解雅可比矩阵的特征值，图 11 为次同步模态对应的特征值实部 σ 与定子模拟电阻 G_p 值的关系。

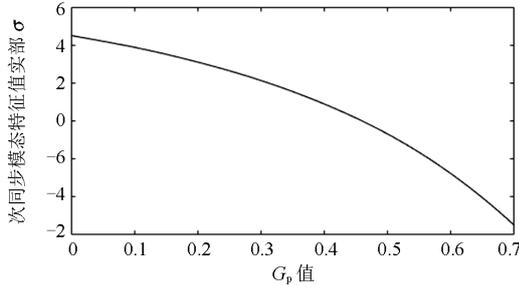


图 11 σ 与 G_p 值的关系

Fig. 11 Relationship between σ and G_p

由图 11 可知，在本文提出的控制方案下，定子侧模拟电感的引入使次同步振荡模态对应的特征值实部由正变负，表明次同步振荡分量由发散变得收敛，系统的次同步稳定性得到改善。而对于系统中的工频分量，定子电流 $i_s - i_s^*$ 的值接近于 0，相对应的补偿量也接近于 0，故新控制方案对于工频分量不会有影响。

4 时域仿真验证

为了验证本文所提出的控制策略对次同步振荡的抑制效果，在双馈风电场经串补并网系统中进行时域仿真。风电场的容量为 100 MW，由 50 台单机容量为 2 MW 的双馈风机组成。单台 DFIG 的主要参数为：定子漏抗 $X_{ls} = 0.09231$ p.u.，定子电阻 $R_s = 0.00488$ p.u.，转子漏抗 $X_{lr} = 0.09955$ p.u.，转子电阻 $R_r = 0.00488$ p.u.，定转子互感 $X_M = 3.9528$ p.u.，变换器直流电压为 $U_{dc} = 1200$ V。变压器及输电线路的主要参数如下：变压器电抗 $X_T = 0.14$ p.u.，电路电阻 $R_L = 0.02$ p.u.，线路电抗 $X_L = 0.50$ p.u.。

图 12 所示为采用常规控制策略下的仿真结果，DFIG 风电场的运行风速为 7 m/s，线路的初始串补度为 20%，系统处于稳态。在 $t=0.5$ s 时刻，改变线路的串补度为 40%、62.5% 和 67% 时，得到风机的电磁转矩 T_e 的振荡曲线。从图中可以看出，40% 串补度下，扰动引起的次同步振荡分量能够自行衰减，系统是稳定的；串补度增加到 62.5%，电磁转矩变成等幅振荡，系统的稳定性变差；当串补度进一步增加到 67% 时，系统稳定性继续恶化，次同步振荡

分量迅速发散，系统失稳。时域仿真结果和第 2 节采用 Nyquist 法分析的结果相同。

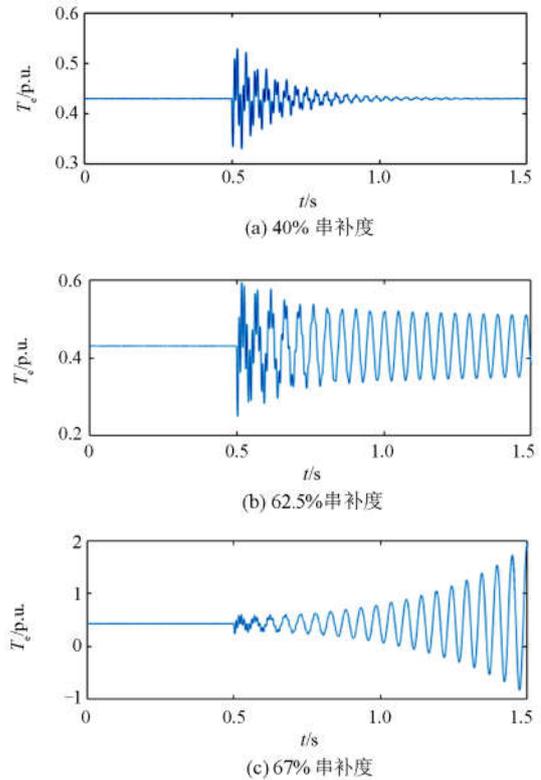
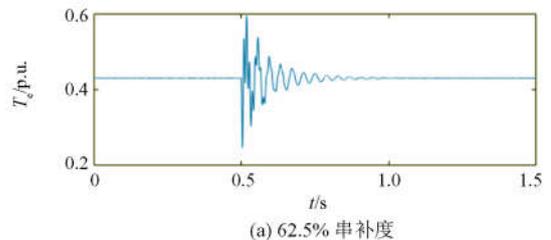


图 12 常规控制策略下的电磁转矩振荡曲线

Fig. 12 Oscillation curve of electromagnetic torque under traditional control strategy

下面采用本文所提出的基于定子侧模拟电阻的控制策略，来观察其对次同步振荡的抑制效果。以完全补偿转子侧的负电阻为依据，可取 $G_p = 0.8$ 。图 13 为采用新控制策略后 DFIG 电磁转矩曲线的仿真图。从图 13(a)、13(b) 可以看出，采用本文提出的控制策略后，原来等幅或者增幅振荡的次同步分量迅速衰减，系统重新恢复稳定。为进一步验证其抑制效果，将线路的串补度继续增加到 80%，如图 13(c) 所示，仿真结果显示系统仍然能平息次同步振荡分量。综上，可以证明本文所提出的基于定子侧模拟电阻的方法能够有效抑制 DFIG 风电场并网系统中的次同步振荡现象，提高系统的稳定性。



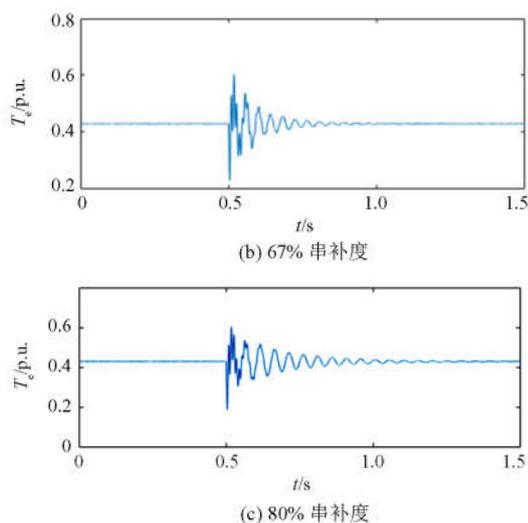


图 13 新控制策略下的电磁转矩振荡曲线

Fig. 13 Oscillation curve of electromagnetic torque under new control strategy

在采用了新的控制策略后,除了需要验证其对次同步振荡的抑制效果,还应该保证其不会对系统中其他控制特性带来消极影响。图 14 所示为 7 m/s 风速下,线路串补度为 67% 时,采用新控制策略后系统中其他参量的仿真曲线,包括发电机的定转子

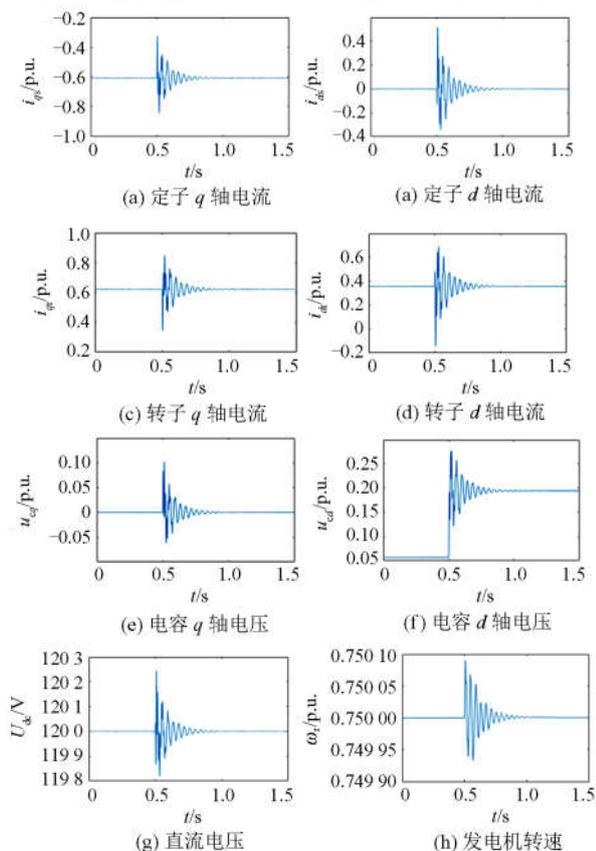


图 14 新控制策略下其它参量的仿真曲线

Fig. 14 Curve of other parameters under new control strategy

电流、转子转速、变流器直流环节电压和串补电容电压等。仿真结果显示,新的控制策略在有效抑制次同步振荡的前提下,不会给系统中其他的控制参量带来不良影响。

5 结论

在 DFIG 风电场并网系统中,串联补偿电容的应用使系统容易发生次同步振荡。本文在 dq 坐标轴下建立了 DFIG 风电场的并网模型,并用 Nyquist 稳定判据分析了风速、线路串补度以及转子侧变流器内环比例系数对系统次同步稳定性的影响。

在次同步振荡抑制方面,当前研究多专注于通过 FACTS 装置或附加阻尼控制器来改善系统稳定性,但这些方法都需要投入附加装置,且参数整定复杂。为此,本文提出了一种基于定子侧模拟电阻的控制策略,仿真结果表明该策略对 DFIG 风电场的次同步振荡具有良好的抑制效果。相较于传统的抑制方法,本文所提方案无需复杂的参数整定,无需任何附加装置,节约了成本,便于实际工程应用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [3] 刘革明, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [4] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149.
ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on sub-synchronous control interaction of a DFIG-based wind power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149.
- [5] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 142-149.

- 2018, 38(22): 6520-6533.
- SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533.
- [6] FAN Lingling, RAJESH K, MIAO Zhixin, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [7] MA Junjie, LIU Fang, JIANG Lin, et al. Multi-DFIG aggregated model based SSR analysis considering wind spatial distribution[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(4): 549-554.
- [8] LEON A E. Integration of DFIG-based wind farms into series-compensated transmission systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 451-460.
- [9] 吕勇, 雷涛, 黄国华, 等. 并网双馈风力机感应发电机效应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 154-158.
- LÜ Yong, LEI Tao, HUANG Guohua, et al. Induction generator effect analysis of doubly-fed wind generator connected to the power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 154-158.
- [10] FAN Lingling, ZHU Chanxia, MIAO Zhixin, et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1010-1020.
- [11] 边晓燕, 施磊, 宗秀红, 等. 多运行方式下风电机组变频器参与次同步相互作用的分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 38-47.
- BIAN Xiaoyan, SHI Lei, ZONG Xiuhong, et al. Analysis and mitigation of wind turbine converters in sub-synchronous interaction under multi-operating conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 38-47.
- [12] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起的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 sub-synchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [13] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.
- CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 84-91.
- [14] CHENG Yunzhi, SAHNI M, MUTHUMUNI D, et al. Reactance scan crossover-based approach for investigating SSCI concerns for DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 742-751.
- [15] 吴熙, 关雅静, 宁威, 等. 双馈风机转子侧变换器参数对次同步振荡的交互影响机理及其应用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2536-2544.
- WU Xi, GUAN Yajing, NING Wei, et al. Mechanism of interactive effect of RSC parameters in DFIG on SSO and its application[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2536-2544.
- [16] FAN Lingling, MIAO Zhixin. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 807-809.
- [17] 董小亮, 谢小荣, 杨煜, 等. 双馈风机串补输电系统次同步谐振影响因素及稳定区域分析[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 189-193.
- DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, YANG Yu, et al. Impacting factors and stable area analysis of sub-synchronous resonance in DFIG wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 189-193.
- [18] EI-MOURSI M S, BAK-JENSEN B, ABDEL-RAHMAN M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 429-441.
- [19] LEON A E, SOLSONA J A. Sub-synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 419-428.
- [20] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场抑制系统次同步振荡分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1613-1620.
- LI Hui, CHEN Yaojun, ZHAO Bin, et al. Analysis and control strategies for depressing system sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1613-1620.
- [21] 朱玲, 许翔, 侯玉强, 等. 基于宽频带转子附加阻尼的双馈型风机次同步振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 37-42.
- ZHU Ling, XU Xiang, HOU Yuqiang, et al. A suppression strategy for DFIG subsynchronous oscillation based on broadband rotor additional damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 37-42.
- [22] 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.

收稿日期: 2019-03-31; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

单碧涵(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性及控制; E-mail: shan_bihan@163.com

王宝华(1968—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划。E-mail: wangbaohua@163.com

(编辑 姜新丽)