

含 DFIG 风机的电力系统次同步谐振 附加阻尼控制器设计

张宋彬¹, 江全元¹, 陈跃辉², 张文磊², 宋军英²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为抑制双馈异步风机经串联补偿线路并网导致的次同步谐振(SSR), 基于阻抗分析的奈奎斯特稳定判据设计了相应的次同步谐振阻尼控制器(SSRDC)。该附加控制器以风机转速偏差作为反馈输入信号引入转子变流器控制的内环中, 采用典型的超前-滞后校正模型。以附加 SSRDC 引入系统后带来好的稳定效果为目的建立优化模型, 并且调用粒子群优化算法求解该优化模型, 得到该控制器参数。MATLAB/Simulink 下的仿真结果表明附加 SSRDC 能够有效地抑制 SSR, 并且在转子侧引入附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果明显比在定子侧引入 SSRDC 好, 同时验证了基于阻抗法设计的附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果比基于状态空间法设计的 SSRDC 更好。

关键词: 双馈异步风机; 风电; 电力系统; 串联补偿; 次同步谐振; 阻抗分析法; 阻尼

中图分类号: TM 614; TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.007

0 引言

近年来, 越来越多的风电接入电力系统中, 据统计, 在 2010 年, 全世界总的风电装机容量增加了 23.6%^[1]。随着风电注入功率的增加, 需要建设新的输电线路或者提高现有输电线路的传输极限。通常提高线路传输极限的方法是在线路中串补电容。但是, 输电线路的不恰当串联电容补偿不仅会引起电力系统“自励磁”运行状态的发生, 还可能会诱发一种更严重的机电耦合振荡——次同步谐振 SSR (SubSynchronous Resonance)^[2]。

近年来发现, DFIG 风机经串补线路接入系统中, 系统容易发生 SSR, 而 SSR 会对 DFIG 风机造成严重的损坏^[3]。所以, 对含 DFIG 风机的 SSR 的研究十分必要。

SSR 现象通常包括感应发电机效应 IGE (Induction Generator Effect) 和机电扭振相互作用 TIE (Torsional Interaction Effect)^[2], 由于在 DFIG 风机和串补网络之间的 TIE 只有当串补很高时才会发生^[4], 所以 TIE 不是本文研究的重点。本文主要研究 IGE, 因为它是引起 SSR 的主要原因。

文献[4-5]通过特征值分析, 得出 SSR 现象与线路串补度、风速以及转子侧的 PI 控制参数有密切的关系, 但是没有提出 SSR 的治理方法。当前治理 SSR 最为常用的方法是通过 FACTS 器件附加一些控制

策略^[6-8]; 文献[6-7]通过调节可控串补(SSSC)控制, 提高串补网络的阻尼进而抑制 SSR, 但是只是针对传统发电机的 SSR 问题; 文献[8]通过在风电场出口处并联接入 STATCOM, 进而抑制 SSR 和功率波动, 但是风电场中的风机是恒速风机, 并不包含 DFIG 风机。文献[9]通过在 DFIG 风机的网侧控制器附加阻尼控制来治理 SSR, 结合了 DFIG 风机的特点, 提出了相应的控制策略, 但是没有考虑转子侧 PI 控制参数对 SSR 的影响。

分析 SSR 的方法大多数基于特征值^[4], 通过状态空间表达式来得到系统的特征矩阵, 进而分析系统的稳定性。本文采用阻抗分析方法, 相比状态空间法有如下优点^[10]: 当独立的电源和负载的阻抗模型已经建立时, 系统的阻抗模型就很容易得到; 增加或减少一个电源、负载, 或者改变负载的运行模式, 只影响对应的阻抗支路, 对系统阻抗模型影响很小; 一个元件的阻抗模型可以通过实验的方法得到; 当系统存在稳定性问题时, 阻抗分析法可以比较方便地给出可能的解决方法。

本文在文献[5, 11]的基础上, 基于阻抗分析方法, 提出了一种在转子变流器侧附加阻尼控制器的方法。该控制方法能够很好地抑制 SSR, 同时由于考虑了 SSR 的振荡频率, 相比于在网侧附加 SSR 阻尼控制器(SSRDC), 在转子侧内环电流控制附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果更好。最后, 在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真系统, 验证了该阻尼控制器抑制 SSR 的作用。

1 基于阻抗分析的奈奎斯特稳定判据

把被研究的系统分割成 2 个子系统, 即电源子系统和负载子系统。电源子系统的戴维南等效电路为

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012-CB215106); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011-AA05A113)

Project supported by the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2012CB215106) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A113)

一个理想电压源 U_s 串联一个输出阻抗 Z_s , 而负荷子系统的模型为阻抗 Z_l , 如图 1 所示。几乎所有的电力电子电路均为非线性的, 所以这种线性化的表达形式只适用于小信号分析。

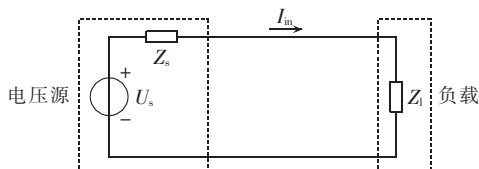


图 1 电压源和负载连接的小信号模型

Fig.1 Small-signal model of voltage source with load

对于假定的小信号模型(图 1 所示), 从电源流向负载的电流为:

$$I_{in}(s) = \frac{U_s(s)}{Z_s(s) + Z_l(s)} \quad (1)$$

式(1)可以写成:

$$I_{in}(s) = \frac{U_s(s)}{Z_l(s)} \frac{1}{1 + Z_s(s)/Z_l(s)} \quad (2)$$

式(2)可以用图 2 所示的传递函数形式来表示。

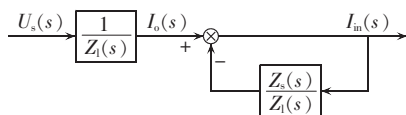


图 2 电压源和负载连接的小信号模型传递函数框图

Fig.2 Transfer function of small-signal model of voltage source with load

对于图 2 所示的系统, 稳定的前提为下述的 3 个条件同时满足: 电源的输出阻抗为零、负荷的输入阻抗为无穷大、 $|Z_s(s)/Z_l(s)| < 1$ 在所有的频率下都成立。但该条件是充分不必要的条件, 下面介绍系统稳定的充分必要条件^[11]。

如图 2 所示, 其传递函数为:

$$I_{in}(s) = I_o(s)H(s) \quad (3)$$

其中, $I_o(s) = U_s(s)/Z_l(s)$, $H(s) = 1/[1 + Z_s(s)/Z_l(s)]$ 。

如式(3)所示, 分析系统的稳定性只需要分析闭环传递函数 $H(s)$ 的表达式即可。根据自动控制理论可知, 闭环系统的稳定性可以通过其开环频率响应 $Z_s(j\omega)/Z_l(j\omega)$ 曲线对 $(-1, j0)$ 点的包围与否来进行判别^[12], 即奈奎斯特稳定判据。

a. 如果开环系统是稳定的, 即分母的所有零点均在 s 域的左半平面时, 则其闭环系统稳定的充要条件是 $Z_s(j\omega)/Z_l(j\omega)$ 曲线不包围 $(-1, j0)$ 点。

b. 如果开环系统不稳定, 且已知有 P 个开环极点在 s 域的右半平面, 则其闭环系统稳定的充要条件是 $Z_s(j\omega)/Z_l(j\omega)$ 曲线按逆时针方向围绕 $(-1, j0)$ 点旋转 P 周。

大多数系统的不稳定发生在 $Z_s(j\omega)/Z_l(j\omega)$ 包围 $(-1, j0)$ 点的时候。假设系统存在一个频率 ω_0 使得

$Z_s(j\omega_0)/Z_l(j\omega_0)$ 是纯实数, 且小于 -1 , 则有:

$$Z_s(j\omega_0) = R_s + jX_s = -KZ_l(j\omega_0) = -K(R_l + jX_l) \quad (4)$$

其中, $K > 1$, 且是一个实数, 所以:

$$R_s + R_l < R_s + KR_l = 0 \quad (5)$$

由式(4)和(5)可得, 在某一频率下, 应用奈奎斯特稳定性判据判定的系统不稳定等价于该系统具有等效的负电阻。

2 系统阻抗模型

本文采用的研究系统如图 3 所示, 单台 1.5 MW 的 DFIG 风机经变压器接入 25 kV 的串补线路, X_{Tg} 代表网侧变流器(GSC)的感性滤波器^[13]。下面将介绍各部分的阻抗模型。

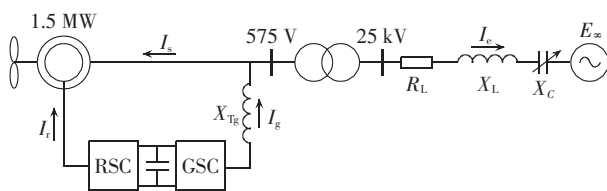


图 3 DFIG 风机经串补接入无穷大系统结构图

Fig.3 Structure of DFIG connected to infinite system via series-compensated network

2.1 RLC 线路的阻抗模型

假设串补线路三相对称, 且不考虑该线路的互感, 则对于三相 RLC 电路的矢量空间(abc 坐标系)表达式如式(6)所示:

$$Z_{net} = \frac{U}{I} = R + sL + \frac{1}{sC} \quad (6)$$

2.2 异步电机的阻抗模型

异步电机的 $dq0$ 模型^[14]如图 4 所示, 根据 dq 坐标系下的异步电机电路可得^[5,15]:

$$U_s(s) = \frac{(s + j\omega_l)L_M}{r_r + [s + j(\omega_l - \omega_m)]L_r} U_r(s) + \underbrace{\left\{ r_s + (s + j\omega_l) \left\{ L_s - \frac{L_M^2 [s + j(\omega_l - \omega_m)]}{r_r + [s + j(\omega_l - \omega_m)]L_r} \right\} \right\}}_{Z_s(s)} I_s(s) \quad (7)$$

式(7)是基于 dq 坐标系, 串补线路 RLC 的阻抗模型是基于 abc 坐标系, 根据 dq 坐标系和 abc 坐标

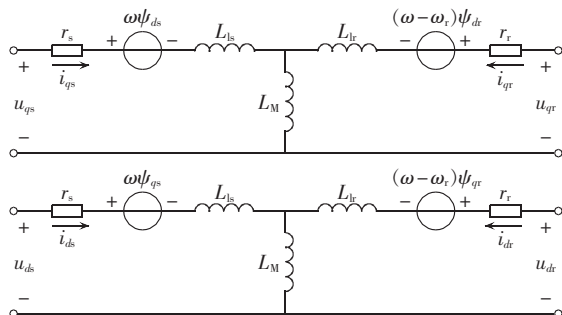


图 4 dq 坐标系下异步电机的电路

Fig.4 Circuits of induction machine in dq axes

系之间的关系式(8),异步电机在 abc 坐标系下的阻抗模型如式(9)所示。

$$U(s) = U_{dq}(s - j\omega_1) \quad (8)$$

$$U_s(s) = \underbrace{\left\{ r_s + s \left[L_s - \frac{L_M^2(s - j\omega_m)}{r_r + (s - j\omega_m)L_r} \right] \right\}}_{Z_s(s)} I_s(s) + \underbrace{\frac{sL_M}{r_r + (s - j\omega_m)L_r} U_r(s)}_{U'_r(s)} \quad (9)$$

由式(9)可得异步电机的阻抗模型等效电路图(等效戴维南电路)如图 5 所示。

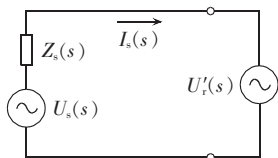


图 5 异步电机的等效戴维南电路

Fig.5 Thevenin equivalent circuit of induction machine

2.3 变流器阻抗模型

DFIG 风机变流器控制采用级联控制^[16-17],控制回路包含内环电流控制和外环功率/电压控制,如图 6 所示。内环电流控制的控制速度很快,频带接近或高于 100 Hz;而外环控制的控制速度较慢,频带只有几赫兹^[5]。对于 SSR 而言,其响应速度远快于外环的功率/电压控制,外环控制可以认为在发生 SSR 时不起作用,因此在分析 SSR 现象时,可以不考虑外环控制。

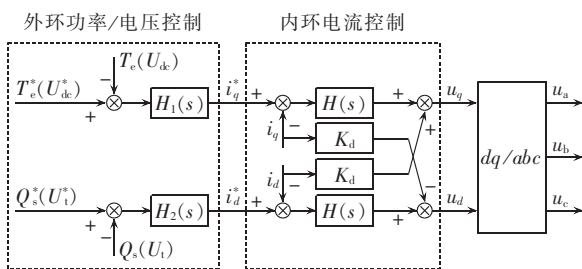


图 6 变流器控制回路

Fig.6 Control loop of converter

如图 6 所示,按照类似异步机推导过程可得:

$$U_s(s) = \underbrace{I_{sc}^*(s)H(s - j\omega_1)}_{U_{sc}^*} - \underbrace{[H(s - j\omega_1) - jK_d]}_{Z_{sc}} I_{sc}(s) \quad (10)$$

由式(10)可得,GSC 和转子侧变换器(RSC)的等效阻抗模型电路图(戴维南电路)如图 7 所示。

对于 GSC 侧:

$$\begin{cases} Z_{gsc} = H_g(s - j\omega_1) - jK_{dg} \\ U_{gsc}^* = I_{gsc}^*(s)H_g(s - j\omega_1) \end{cases} \quad (11)$$

对于 RSC 侧:

$$\begin{cases} Z_{rsc} = H_r(s - j\omega_1) - jK_{dr} \\ U_{rsc}^* = I_{rsc}^*(s)H_r(s - j\omega_1) \end{cases} \quad (12)$$

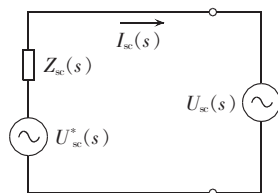


图 7 GSC 和 RSC 的等效戴维南电路

Fig.7 Thevenin equivalent circuit of GSC and RSC

2.4 整个系统的等效电路模型

由 2.1、2.2 和 2.3 节内容可得到如图 8 所示的整个系统的等效阻抗模型。该模型包含两部分阻抗:DFIG 风机阻抗 Z_{DFIG} 和串补网络阻抗 Z_{net} 。

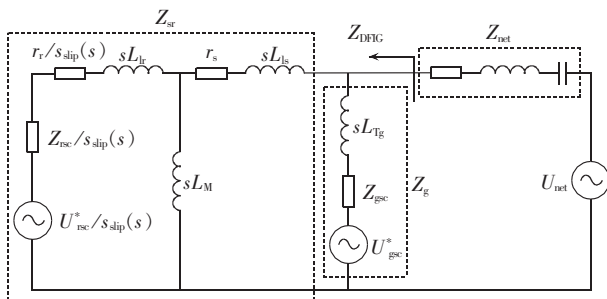


图 8 整个系统的等效电路图

Fig.8 Equivalent circuit of overall system

由转差率 s_{slip} 的定义可知, $s_{slip} = 1 - \omega_m / \omega_1$, 在 s 平面下,转差率的表达式变为:

$$s_{slip}(s) = \frac{s - j\omega_m}{s} \quad (13)$$

线路的谐振频率为:

$$f_n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L + X_T}} \quad (14)$$

其中, X_L 和 X_T 分别为线路电抗和变压器电抗; X_C 为串联电容容抗。一般而言,在 SSR 谐振频率下, Z_g 的幅值远大于 Z_{sc} 的幅值^[5],所以以下的分析均忽略 Z_g 所在的支路。

2.5 谐振频率下 SSR 对 DFIG 风机的影响

当线路谐振频率为 f_n 时,时域下转差率的表达式为:

$$s_{slip} = \frac{f_n - f_N}{f_n} \quad (15)$$

其中, f_N 为系统额定频率,因为 $f_n < f_N$, 所以 $s_{slip} < 0$, 即异步发电机的转子电阻为负。此时系统的等效电阻为:

$$R_{sys, f_n} = R_{net, f_n} + R_{DFIG, f_n} \quad (16)$$

当线路的串补度不同时, f_n 不同,系统的等效电阻 R_{sys, f_n} 也不同。线路接入的串补度越高, f_n 越接近 f_N , s_{slip} 越小,转子电阻 R_r / s_{slip} 负阻尼越大,则 R_{DFIG, f_n} 负阻尼也越大。如果 R_{DFIG, f_n} 负阻尼过大,则可能导致 R_{sys, f_n} 呈现负阻尼,系统振荡将加剧,最后失去稳定。

如图 9 所示(U 为标么值),当串补度 $\delta_{sc}=70\%$ 时,DFIG 风机出口处的电压幅值振荡幅度达到近 2 倍的额定电压,如此高的电压,势必对风机造成危害。同时风机的撬棒回路的启动导致机器的自激励,风机中的电力电子控制作用导致了负阻尼和系统不稳定性的进一步加深^[3],致使电压振荡加剧,如此产生恶性循环,又加剧了对风机的影响。

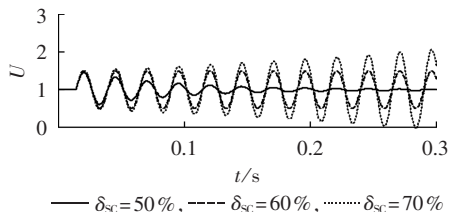


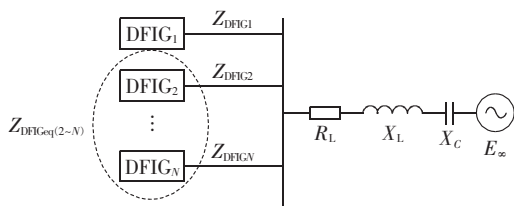
图 9 DFIG 风机端电压幅值

Fig.9 Voltage amplitude of DFIG terminal

2.6 风电场下系统的等效阻抗模型

如图 10 所示,由 N 台 DFIG 风机构成的风电场,经高压串补线路输送到无穷大系统。首先根据 2.1—2.4 节的方法建立所有 DFIG 风机的等效阻抗模型(等效阻抗为 $Z_{DFIGi}(i=1,2,\dots,n)$),进而可以得到整个风电场的等效阻抗模型:

$$Z_{DFIGeq} = Z_{DFIG1} // Z_{DFIG2} // \dots // Z_{DFIGN} \quad (17)$$

图 10 N 台 DFIG 风机构成的风电场经串补线路接入无穷大系统Fig.10 Connection of N DFIGs to infinite system via series-compensated network

如果分析 SSR 对任意一台风机(假设第 1 台风机)的影响,只需要将除了这台风机以外的所有风机(2~ N)等效为一台风机 $Z_{DFIGeq(2-N)}$,第 1 台风机单独考虑,如图 10 中所示。当 $\delta_{sc}=50\%$ 时,所有风机单独考虑与该方法等效考虑的对比如图 11、12 所示。

图 11、12 的仿真结果都是第 1 台风机的电磁转矩 T_e (标么值),可知,该等效方法很好地符合实际情况,能够用于分析 SSR 对任意一台风机的影响。

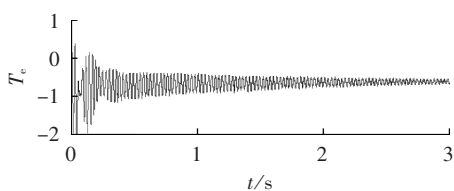


图 11 DFIG 风机单独考虑的仿真结果

Fig.11 Simulative result when single DFIG is considered

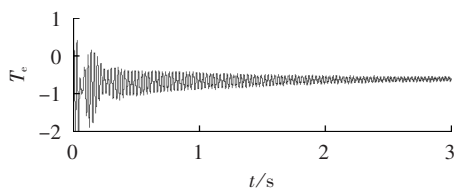


图 12 DFIG 风机等效考虑的仿真结果

Fig.12 Simulative result when all DFIGs are equally considered

3 附加 SSR 阻尼控制器的设计

考虑到 SSR 的谐振频率范围 10~40 Hz^[18],同时考虑 RSC 内外环的动态响应频率,为抑制 SSR,提出在 RSC 的内环电流控制中附加 SSRDC,如图 13 所示。

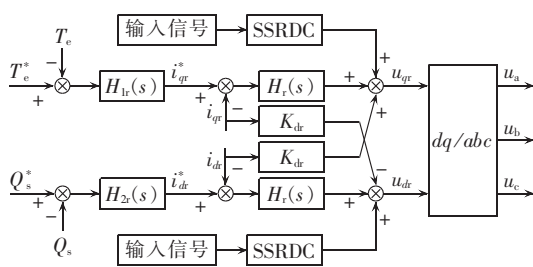


图 13 RSC 侧电流内环附加 SSRDC

Fig.13 SSRDC added to inner control loop of RSC

3.1 SSRDC 结构设计

文献[4]中提到,风速以及线路串补对 SSR 具有很大的影响,所以本文提出以风机转速偏差 $\Delta\omega_m$ 作为控制器的输入信号,将 $\Delta\omega_m$ 反馈引入 RSC 控制的内环中。

SSRDC 采用超前-滞后校正模型,其传递函数如下^[16]:

$$s_{slip_signal}(s) = D_{SSR} \Delta\omega_m \quad (18)$$

其中, $D_{SSR} = K_{SSR} \frac{s\tau_w}{1+s\tau_w} \frac{1+s\tau_1}{1+s\tau_2} \frac{1+s\tau_3}{1+s\tau_4}$; K_{SSR} 为 SSRDC 增益; τ_w 为隔直环节时间常数; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 为相位补偿环节时间常数。通常情况下, τ_w, τ_2, τ_4 是预先确定的。本文中时间常数 τ_w, τ_2, τ_4 取值分别为 5 s、0.05 s、0.05 s^[19]。增益 K_{SSR} 和时间常数 τ_1, τ_3 为待优化的参数。

3.2 基于 PSO 算法优化 SSRDC 的控制参数

如图 3 所示的系统,附加 SSRDC 控制后的阻抗模型如图 14 所示。由 2.4 节内容介绍可知,系统的开环传递函数 Z_{net}/Z_{sr} 为:

$$\frac{Z_{net}}{Z_{sr}} = \frac{R_L + sL + 1/(sC)}{r_s + sL_{ls} + sL_M // \left[sL_{lr} + \frac{r_r + Z_{rsc}}{s'_{slip}(s)} \right]} \quad (19)$$

根据 3.1 节的分析可得 $s'_{slip}(s)$ 的表达式为:

$$s'_{slip}(s) = \frac{s - j[\omega_m + s_{slip_signal}(s)]}{s} = \frac{s - j(\omega_m + D_{SSR} \Delta\omega_m)}{s} \quad (20)$$

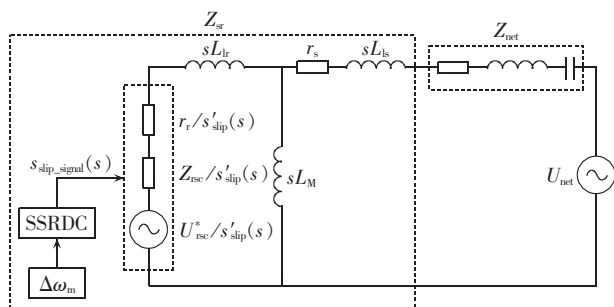


图 14 附加 SSRDC 系统的等效电路图

Fig.14 Equivalent circuit of system with additional SSRDC

根据奈奎斯特稳定判据,分析系统的开环传递函数 Z_{net}/Z_{sr} 的奈氏曲线,可以得到系统的增益裕量 K_g 和相位裕量 γ ,由于工程上通常要求 γ 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间^[12],而增益裕量越大越好,所以本文优化的目标函数为:

$$J = \min \{K_{g,ij}, i=1,2,\dots,k_1; j=1,2,\dots,k_2\} \quad (21)$$

其中, $K_{g,ij}$ 为在第 i 种串补度、第 j 种风机转速下的增益裕量; k_1 为串补度数; k_2 为不同风机转速数。附加 SSRDC 后希望 J 尽可能的大,为此可将优化问题描述如下:

$$\begin{cases} \max J \\ \text{s.t.} & K_{SSR}^{\min} \leq K_{SSR} \leq K_{SSR}^{\max} \\ & \tau_1^{\min} \leq \tau_1 \leq \tau_1^{\max} \\ & \tau_3^{\min} \leq \tau_3 \leq \tau_3^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

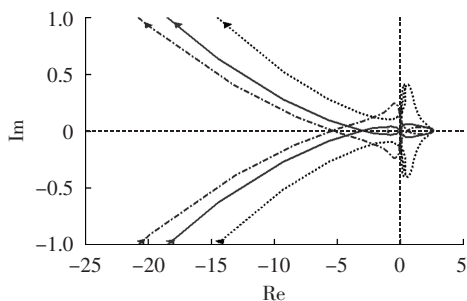
其中, $K_{SSR} \in [0.1, 100]$; 时间常数 τ_1 和 τ_3 取值范围为 $[0.01, 1]s$ ^[17]。保持系统稳定,附加如下 2 个约束:

$$\begin{cases} 30^\circ \leq \gamma_{ij} \leq 60^\circ \\ K_{g,ij} > 1 \end{cases} \quad (23)$$

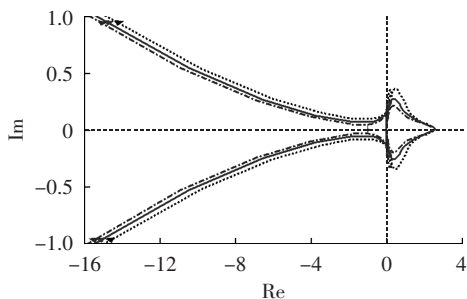
其中, γ_{ij} 为在第 i 种串补度、第 j 种风机转速下的相位裕量。

本文调用粒子群优化(PSO)算法解决上述优化问题,经优化计算得到 K_{SSR} 、 τ_1 、 τ_3 值分别为 26.434、0.113 s、0.059 s,目标函数 $J_{\max} = 5.561$ 。

附加 SSRDC 采用上述优化出的参数值,附加该控制器后,系统的开环传递函数 Z_{net}/Z_{sr} 在不同风机转速下和不同串补度下的奈奎斯特曲线如图 15 和图 16 所示。如图 15(a)所示,在不同串补度下,当不加 SSRDC 时, Z_{net}/Z_{sr} 的奈奎斯特曲线包围 $(-1, j0)$ 点,此时系统不稳定;如图 15(b)所示,当附加该控制器后,该曲线不包围 $(-1, j0)$ 点,此时系统稳定。因此对比图 15(a)和 15(b)可得结论:在不同串补度下,该控制器都能够有效地抑制 SSR。如图 16(a)和 16(b),同理分析可得结论:在不同风机转速下,该控制器同样能有效地抑制 SSR。综合以上分析可知,附加 SSRDC 能够有效地抑制系统的 SSR。

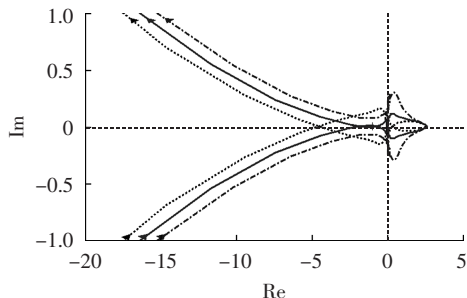


(a) 不加 SSRDC

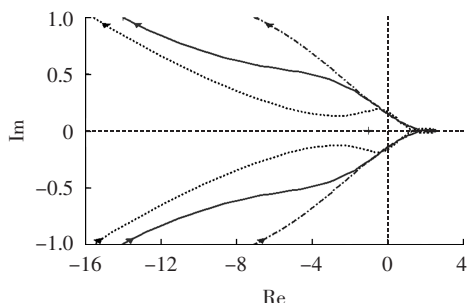


(b) 附加 SSRDC

..... $\delta_{SC} = 50\%$, — $\delta_{SC} = 60\%$, - - - $\delta_{SC} = 70\%$

图 15 不同串补度下 Z_{net}/Z_{sr} 的奈奎斯特曲线Fig.15 Nyquist curves of Z_{net}/Z_{sr} for different δ_{SC} values

(a) 不加 SSRDC



(b) 附加 SSRDC

..... $\omega_m = 0.7 \text{ p.u.}$, — $\omega_m = 0.8 \text{ p.u.}$, - - - $\omega_m = 0.9 \text{ p.u.}$

图 16 不同风机转速下 Z_{net}/Z_{sr} 的奈奎斯特曲线Fig.16 Nyquist curves of Z_{net}/Z_{sr} for different ω_m values

4 仿真分析

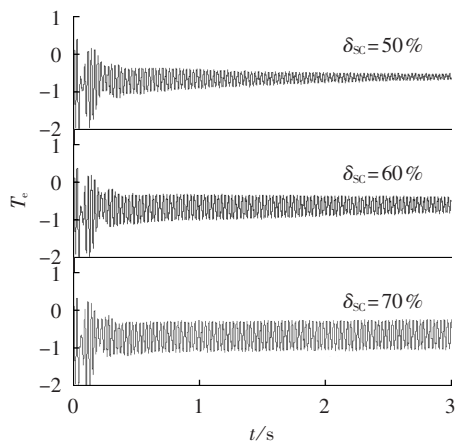
在 MATLAB/Simulink 下搭建如图 3 所示的仿真系统,风机额定功率 1.5 MW,定子额定电压 575 V,定子电阻 $r_s = 0.023 \text{ p.u.}$,转子电阻 $r_r = 0.016 \text{ p.u.}$,定子漏感 $L_{ls} = 0.18 \text{ p.u.}$,转子漏感 $L_{lr} = 0.16 \text{ p.u.}$,励磁电感 $L_M = 2.9 \text{ p.u.}$ 。线路电阻 $R_L = 0.02 \text{ p.u.}$,线路电抗 $X_L =$

0.5 p.u.。GSC 侧滤波电抗 $X_{Tg}=0.3$ p.u.。

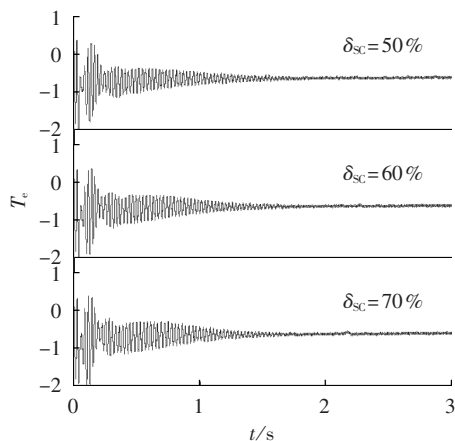
4.1 转子侧附加 SSRDC 抑制 SSR 效果分析

设置 2 个仿真场景来检验 SSRDC 抑制 SSR 的效果:固定 $\omega_m=1$ p.u.,不同 δ_{sc} ;固定 $\delta_{sc}=50\%$,不同 ω_m 。仿真结果如图 17、18 所示(T_e 为标么值,后同)。

如图 17 所示,线路串补度越大,系统的 SSR 越严重。当 $\delta_{sc}=50\%$ 时,系统最终的振荡会趋于稳定;当 $\delta_{sc}=60\%$ 时,振荡加剧,此时的 SSR 谐振频率为



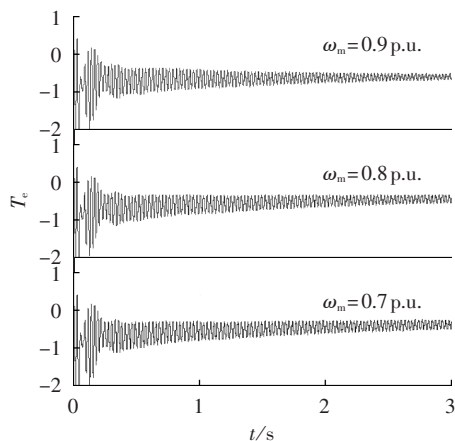
(a) 不加 SSRDC



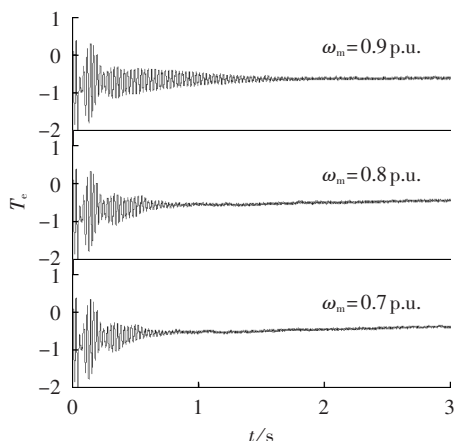
(b) 附加 SSRDC

图 17 不同串补度下 SSRDC 抑制 SSR 的效果

Fig.17 Results of damping SSR with SSRDC for different δ_{sc} values



(a) 不加 SSRDC



(b) 附加 SSRDC

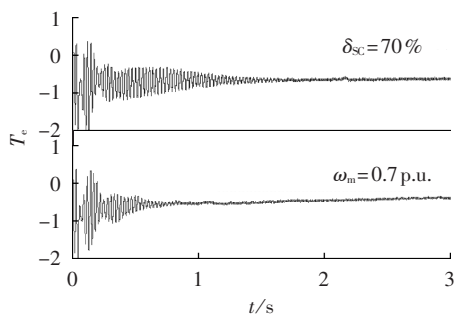
图 18 不同风机转速下 SSRDC 抑制 SSR 的效果

Fig.18 Results of damping SSR for different ω_m values

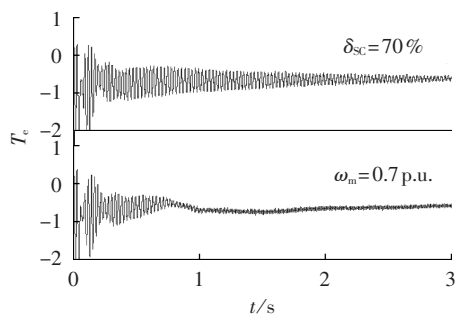
25 Hz(振荡周期为 0.04 s);当 $\delta_{sc}=70\%$ 时,系统将失去稳定,此时的 SSR 谐振频率为 33 Hz(振荡周期为 0.03 s)。当附加 SSRDC 后,即使在 $\delta_{sc}=70\%$ 时,系统的 SSR 都能被抑制,因此该附加控制器能够很好地抑制系统的 SSR。如图 18 所示,风机转速越低,系统的 SSR 越严重。而附加 SSRDC 后, ω_m 变化时,SSR 都能够被很好地抑制。2 种情况说明,无论在高串补度,还是在低风速下,该控制都能够有效地抑制 SSR。

4.2 转子侧和网侧附加 SSRDC 抑制 SSR 效果对比

如图 19 所示,当系统出现严重的 SSR($\delta_{sc}=70\%$ 或者 $\omega_m=0.7$ p.u.)时,在转子侧附加 SSRDC 时,最终达到稳定所需要的时间明显少于在网侧附加 SSRDC,



(a) 转子侧附加 SSRDC



(b) 网侧附加 SSRDC

图 19 转子侧和网侧附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果

Fig.19 SSR damping results of rotor-side and grid-side SSRDCs

因此可知,在转子侧附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果优于在网侧附加 SSRDC。

4.3 基于阻抗法与基于状态空间法附加 SSRDC 抑制 SSR 效果对比

基于状态空间法设计的附加 SSRDC^[17],该附加 SSRDC 采用的结构与基于阻抗法设计的附加 SSRDC 结构一样。2 种方法设计的附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果如图 20 所示,可以看出,基于阻抗法设计的 SSRDC 抑制 SSR 所需要的时间更少,因此可知,基于阻抗法设计的附加 SSRDC 抑制 SSR 效果更好。

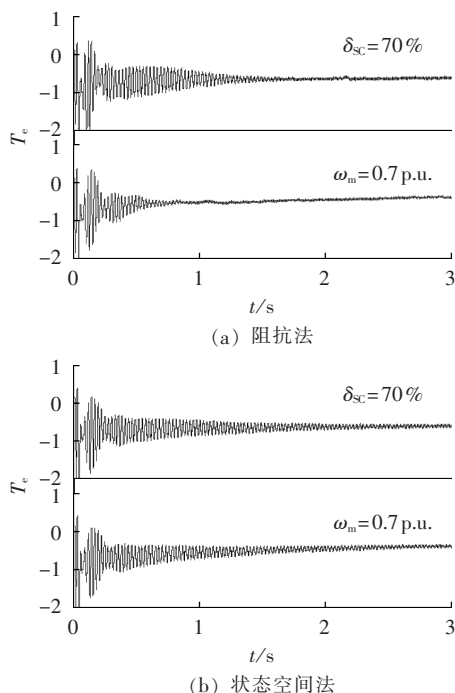


图 20 基于不同方法设计 SSRDC 抑制 SSR 的效果

Fig.20 SSR damping results of SSRDCs designed by different methods

5 结论

本文针对 DFIG 风机经串补线路接入网络造成的 SSR,设计了相应的附加 SSRDC;并且通过奈奎斯特稳定判据分析系统的稳定性,以此指导 SSRDC 参数的设计。最后,通过在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型首先验证了该控制器能够有效地抑制 SSR,其次验证了在转子侧附加 SSRDC 控制器比在网侧附加该控制器抑制 SSR 振荡的效果更好,最后验证了基于阻抗法设计的附加 SSRDC 抑制 SSR 的效果优于基于状态空间法设计的附加 SSRDC。

参考文献:

[1] SURIYAARACHCHI D H R,ANNAKAGE U D,KARAWITA C,et al. A procedure to study sub-synchronous interactions in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):377-384.

[2] 文劲宇,孙海顺,程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力

系统保护与控制,2008,36(12):1-4,7.

WEN Jinyu,SUN Haishun,CHENG Shijie. Sub-synchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control,2008,36(12):1-4,7.

- [3] IRWIN G D,JINDAL A K,ISAACS A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems[C]//Power and Energy Society General Meeting. Winnipeg,MB,Canada:[s.n.],2011:1-6.
- [4] FAN Lingling,KAVASSERI R,MIAO Zhixin,et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2073-2082.
- [5] 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.
- [6] BONGIORNO M,ANGQUIST L,SVENSSON J. A novel control strategy for subsynchronous resonance mitigation using SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):1033-1041.
- [7] THIRUMALAIVASAN R,JANAKI M,PRABHU N. Damping of SSR using subsynchronous current suppressor with SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):64-74.
- [8] EL-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.
- [9] FAN Lingling,MIAO Zhixin. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2012,3(3):349-358.
- [10] SUN Jian. Small-signal methods for AC distributed power systems—a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(11):2545-2554.
- [11] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(11):3075-3078.
- [12] 邹伯敏. 自动控制理论[M]. 北京:机械工业出版社,2007:185-195.
- [13] 陈波,吴政球. 双馈感应风力发电机强迫功率振荡的频域分析法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):15-22.
- CHEN Bo,WU Zhengqiu. Frequency domain analysis of forced power oscillation induced by doubly-fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):15-22.
- [14] KRAUSE P. Analysis of electric machinery[M]. New York,USA: McGraw-Hill,1986:101-107.
- [15] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):20-24.
- ZHU Ying,LI Jianlin,ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):20-24.
- [16] 李国庆,王鹤,李鸿鹏. 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):1-7.
- LI Guoqing,WANG He,LI Hongpeng. Control strategy for DFIG-based wind farm in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):1-7.
- [17] 安树怀,王明渝,邓威,等. 可用于光伏并网的双频逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):84-88.
- AN Shuhuai,WANG Mingyu,DENG Wei,et al. Control strategy of dual-frequency inverter suitable for photovoltaic grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):84-88.
- [18] RUSTEBAKKE H M,CONCORDIA C. Self-excited oscillations

in a transmission system using series capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1970,PAS-89 (7): 1504-1512.

[19] 郭成,李群湛. 基于改进 PSO 算法的 SSSC 广域阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报,2010,25(1):151-158.

GUO Cheng,LI Qunzhan. SSSC wide-area damping controller design based on improved particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25 (1): 151-158.

作者简介:



张宋彬

张宋彬(1989-),男,河南永城人,硕士研究生,主要研究方向为含风电的弱电网次同步谐振(E-mail:zsbly@zju.edu.cn);

江全元(1975-),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统高性能计算、新能源发电与储能技术(E-mail:jqy@zju.edu.cn)。

Design of additional SSR damping controller for power system with DFIG wind turbine

ZHANG Songbin¹,JIANG Quanyuan¹,CHEN Yuehui²,ZHANG Wenlei²,SONG Junying²

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China;
2. Hunan Electric Power Company,Changsha 410007,China)

Abstract: In order to suppress the SSR(SubSynchronous Resonance) caused by the grid connection of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) wind turbine via series compensated network,an additional SSR damping controller with the impedance-based Nyquist stability criterion is designed,which takes the wind deviation as the input signal of the inner control loop of rotor converter and applies typical lead-lag correction model. In order to achieve better system stability,an optimization model is established and solved by calling particle swarm optimization algorithm. The results of simulation with MATLAB/Simulink show that,the additional SSR damping controller suppresses the SSR effectively,its effect at rotor side is better than that at stator side,and the effect of impedance-based SSR damping controller is better than that of state-space-based one.

Key words: DFIG wind turbine; wind power; electric power systems; series compensation; subsynchronous resonance; impedance-based analysis; damping

(上接第 29 页 continued from page 29)

Impact of PV integration on safety and stability of Yushu Grid and control strategy

ZHOU Jun,DING Jian,WANG Qing,SONG Yunting,LI Yuanyuan

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: According to the actual operational conditions of Yushu Grid,an electromechanical transient simulation model with PV station is built based on BPA software,with which,the transient characteristics of Yushu Grid isolated from Qinghai main grid is researched. It is found that the frequency stability is the main problem of isolated Yushu Grid. The key section fault simulation technology is applied to analyze the impact of the output power and access location of PV station on the strategy of safety and stability control, based on which,a control strategy is proposed for isolated Yushu Grid. It is suggested that,the unit protection,instead of the high-frequency tripping scheme,should be adopted to solve the high-frequency problem under its typical operation mode and the low-frequency load shedding scheme should be adopted to solve the frequency stability problem. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation.

Key words: PV; electric power generation; isolated network; safety; stability; control