

基于VSC的双馈风电场群宽频带次同步谐振抑制作用分析与实验

廖坤玉¹,肖湘宁¹,罗超²,陶顺¹,杨志超¹,于弘洋³,刘宗焯³,刘辉⁴

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;

2. 南方电网科学研究院,广东 广州 510080;3. 全球能源互联网研究院,北京 102209;

4. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院,北京 100045)

摘要:双馈风电场的次同步谐振频率具有宽频时变特性,为其抑制带来了难题。对此,基于并联型电压源换流器(VSC)技术,设计了双馈风电场群宽频带次同步谐振的抑制装置,并将其安装于风电场群的汇集线上,将抑制装置等效为受控源,给出了分析该装置抑制双馈风电场次同步谐振作用的等值电路的一般形式和简化形式,通过次同步电流的响应方程揭示了其抑制次同步谐振的作用。该装置测取汇集线的次同步电流作为馈入信号,采用宽频滤波器并进行相位补偿的方案提取振荡模态,调整其幅值和相位后,向系统中注入次同步阻尼电流,通过增强系统阻尼实现抑制。不同工况下的数字-物理闭环仿真实验结果表明,通过参数优化设计,该装置能快速、准确地动态检测出宽频带次同步谐振信号并实现有效的抑制,可集中解决大型风电场群的时变次同步谐振。

关键词:双馈风电场群;电压源换流器;时变频率;宽频带次同步谐振;谐振抑制;作用分析;数字-物理闭环仿真

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909043

0 引言

随着新能源渗透率的提高,风能发电的比重越来越大。集群式风电场具有充分开发风能的优势,其规模化是风能利用的发展方向之一。以双馈风电机组(DFIG)为主的风电输送系统发生过危害较严重的次同步谐振SSR(Sub-Synchronous Resonance)^[1-2]。2011年加拿大Buffalo Ridge地区的双馈风电场串联补偿系统发生了频率为9~13 Hz的SSR^[3];2012年底中国沽源双馈风电场发生了频率为6~9 Hz的SSR^[4]。由上述案例可知,风电输送系统的SSR具有宽频时变特性^[5]。

SSR的宽频时变特性对其抑制策略及参数的鲁棒性提出了极高的要求,是风电SSR抑制需要解决的关键难题。在风电SSR抑制方面,已开展的研究主要集中在变流器控制参数优化、风机变流器附加阻尼控制和基于灵活交流输电FACTS(Flexible AC Transmission System)技术的抑制策略3个方面^[6]。

变流器控制参数优化^[7-8]和风机变流器附加阻尼控制^[9-13]均需通过改动单台风机的控制环来实现,但大型风电场中的风机数目众多,难以实施。针对风电集群的SSR问题,基于FACTS的抑制装置的安装简单,更易实现。

关于基于FACTS的抑制装置的研究,文献[14]采用静止同步补偿器来抑制风电场串联补偿输电系统中由感应发电机效应和轴系扭振引起的次同步振荡;文献[15]以网侧次同步电流作为馈入信号,通过优化滤波器的参数,在SSR频段内使输出的次同步电流与电压源换流器(VSC)连接点的次同步电压保持同相位,以提供正阻尼;文献[16]基于留数法开展分析研究,结果表明以风电场与电网联络线的电流和功率作为VSC的馈入信号,抑制效果较好。虽然加装并联VSC来抑制风电次同步振荡的研究逐渐增多,但对其抑制作用尚未有深入分析。双馈风电场的SSR属于电气谐振,无轴系参与,根据复转矩系数法求解并联VSC为火电机组提供的电气阻尼的原理解释不再适用,因此,根据其特性研究并联VSC装置抑制双馈风电场SSR的原理十分必要。文献[15]将VSC等效为阻抗,从阻抗角度说明了其抑制SSR的原理。文献[17]则将SSR抑制装置等效为电流源,认为装置注入系统的次同步电流阻断了原有的谐振通路,但并未分析阻断原理。从运行方式上看,附加次同步阻尼控制环的VSC抑制装置的本质是以所监测电气量为控制信号的不同形式的受控源,因此从

收稿日期:2018-08-12;修回日期:2019-07-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51777066);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017XS011);国家电网公司科技项目(52010116000S)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51777066),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017XS011) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(52010116000S)

电路角度将其等效为受控源更为合理。

为此,本文提出了基于VSC的双馈风电场群SSR的宽频带抑制方法,将所研究的装置称为次同步谐振动态抑制器SSR-DS(Sub-Synchronous Resonance Dynamic Suppressor)。首先,利用阻抗法分析了双馈风电场串联补偿输电系统SSR的产生条件与时变特性;在此基础上,介绍了SSR-DS的控制结构与抑制策略;然后,将抑制装置等效为受控电流源,从电路角度通过次同步电流的响应方程分析了所研究装置对双馈风电场SSR的抑制作用原理;最后,给出关键参数的设计与优化,并开展了不同工况下的数字-物理闭环仿真实验,结果验证了所提抑制方法的有效性和动态性能,表明其可集中解决大型风电场群的时变SSR。

1 双馈风电集群SSR的阻抗分析与时变特性

双馈风电场系统的SSR本质上属于电气谐振,从阻抗角度可简单清晰地阐明其产生条件和时变特性。文献[18]建立了DFIG的输入阻抗模型,分析了输入阻抗的时变特性与影响因素。在考虑励磁的情况下,计及转子侧控制器RSC(Rotor Side Converter)和锁相环(PLL)影响的DFIG输入阻抗的频域模型为:

$$Z_{\text{dfig}}^{\text{pll}}(\omega_p, \omega_r) = \frac{(R_s + j\omega_p L_s) - \frac{(j\omega_p L_m)^2}{\left(\frac{R_r}{\sigma_p} + j\omega_p L_r\right) + \frac{Z_{\text{RSC}}}{\sigma_p}}}{1 + (-1)^m \frac{j\omega_p L_m}{\left(\frac{R_r}{\sigma_p} + j\omega_p L_r\right) + \frac{Z_{\text{RSC}}}{\sigma_p}} \frac{K_{\text{sr}}}{\sigma_p}} \quad (1)$$

其中,各变量的含义说明与推导过程详见文献[18]。正序扰动转差率 $\sigma_p = (\omega_p - \omega_r)/\omega_p$,当扰动角频率 ω_p 小于转子角频率 ω_r 时, $\sigma_p < 0$,由式(1)可知,DFIG的转子电阻、RSC和锁相环的共同参与将使DFIG的输入阻抗具有负电阻特性。

由于考虑影响因素的完备性和推导过程的差异,不同文献中DFIG输入阻抗的解析式不尽相同。综合已有文献的阻抗推导和分析^[18-21], n 台DFIG组成网络拓扑复杂的双馈风电场,经串联补偿系统接入电网后,系统的总阻抗可表示为:

$$Z_{\text{st}}(f_p, f_r, n) = R_{\text{st}}(f_p, f_r, n) + jX_{\text{st}}(f_p, f_r, n) = R_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) + jX_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) + R_g + jX_g(f_p) \quad (2)$$

其中, f_p 为扰动频率; f_r 为转子频率; $Z_{\text{st}}(f_p, f_r, n)$ 、 $R_{\text{st}}(f_p, f_r, n)$ 、 $X_{\text{st}}(f_p, f_r, n)$ 分别为双馈风电场串联补偿输电系统的总阻抗、总电阻、总电抗; R_g 、 $X_g(f_p)$ 分别为电网的等值电阻、电抗; $Z_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) = R_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) +$

$jX_{\text{wf}}(f_p, f_r, n)$ 为双馈风电场的输入阻抗, $R_{\text{wf}}(f_p, f_r, n)$ 、 $X_{\text{wf}}(f_p, f_r, n)$ 分别为双馈风电场的输入电阻、输入电抗。当忽略DFIG间的交互影响和互联线路阻抗时,对于并联在同一母线的DFIG而言,有 $Z_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) = Z_{\text{dfig}}(f_p, f_r)/n$, $Z_{\text{dfig}}(f_p, f_r)$ 为单台DFIG的输入阻抗。

设 ρ 为次同步范围内的频率区间,DFIG输入阻抗和电网阻抗具有如下性质:

$$\begin{cases} R_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) < 0 \\ X_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) > 0 \quad \exists \rho, \forall f_p \in \rho \\ X_g(f_p) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

记频率区间 ρ 内发生SSR时的频率 $f_p = f_{\text{sub}}$,则SSR频率 f_{sub} 和衰减因子 α 的表达式为:

$$\begin{cases} f_{\text{sub}} = \sqrt{\frac{\lambda L_g}{L_{\text{st}}(f_{\text{sub}}, f_r, n)}} f_0^2 - \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 \\ \alpha = \frac{R_{\text{st}}(f_{\text{sub}}, f_r, n)}{2L_{\text{st}}(f_{\text{sub}}, f_r, n)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ 为串联补偿度; L_g 为线路电感; $L_{\text{st}}(f_{\text{sub}}, f_r, n)$ 为串联补偿系统和风电场的等值电感总和; f_0 为工频。

由上述分析可以知道,SSR是双馈风电场和串联补偿系统参数匹配的结果,当 $f_{\text{sub}} < f_r$ 时, $\sigma_p < 0$ 使 $R_{\text{wf}}(f_p, f_r, n) < 0$,若 $R_{\text{st}}(f_{\text{sub}}, f_r, n) \leq 0$,系统将出现发散形式或等幅形式的SSR。由式(4)可知,当线路和DFIG的参数确定时,对于不同的 f_r 、 n 和 λ , f_{sub} 和 α 将不同; f_r 和风速 v_w 具有对应关系, v_w 和 n 是随机变化因素, λ 是允许调控的变化因素,三者共同主导了 f_{sub} 和 α 的大小。因此, v_w 和 n 的时变特性会给 f_{sub} 和 α (即串联补偿输电系统SSR的频率和阻尼)带来时变特性^[22]。

图1为沽源风电场220 kV沽察线上某时间段内次同步电流录波的滑窗快速傅里叶变换(FFT)分析结果,由图可看出其频率随时间变化。上述理论分析和实测数据一致表明:双馈风电场串联补偿输电系统的SSR具有时变特性。该特性不同于火电机组的模态频率固定的次同步振荡,治理时需要充分考虑,使抑制装置的参数能够适应双馈风电场的时变SSR。

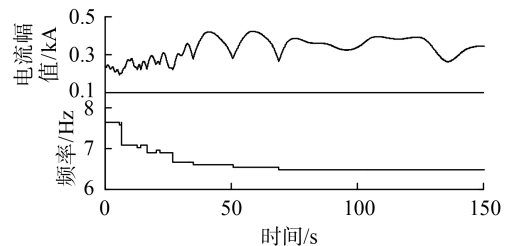
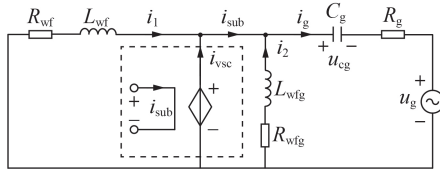


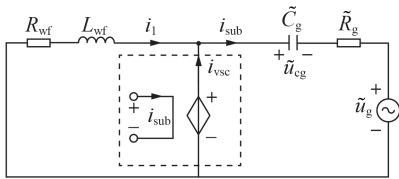
图1 次同步电流的变化趋势

Fig.1 Change trend of sub-synchronous current

上均有风电场汇入,为了抑制SSR,馈入信号测取的是两变电站间沽察线上的电流,为了在电路分析中保留馈入信号,需要以联络线为界将系统分为2个风电集群做初始分析。考虑上述情形,在SSR-DS的两侧,通过阻抗的串并联等效,SSR频率下加入SSR-DS后的双馈风电场串联补偿输电系统等值电路的一般形式如图5(a)所示,图5(b)为其简化形式。为了方便表述,图中符号不再附加第1节中所述的变量因素 f_p, f_r, n 等。



(a) 等值电路的一般形式



(b) 等值电路的简化形式

图5 加入SSR-DS后的系统等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of system with SSR-DS

图5中, R_{wf}, R_{wfg} 为2个等值双馈风电场群的输入电阻; L_{wf}, L_{wfg} 为2个等值双馈风电场群的输入电感; C_g 为由电网次同步电抗折算得到的等值电容, u_{cg} 为其两端的次同步电压; $\tilde{C}_g$ 为折算得到的等值电容, $\tilde{u}_{cg}$ 为其两端的次同步电压; $\tilde{R}_g$ 为折算得到的等值电阻; u_g 和 $\tilde{u}_g$ 分别为折算前、后的次同步扰动电压源,决定系统振荡特性的等值电路与 $u_g, \tilde{u}_g$ 无关,即阻尼特性分析与 $u_g, \tilde{u}_g$ 无关,且扰动源通常是短时作用的,故在分析VSC的抑制作用时,可假设 $u_g = 0, \tilde{u}_g = 0$; i_1, i_2 为2个等值双馈风电场群汇集线的次同步电流; i_{sub} 为等值双馈风电场群联络线的次同步电流; i_g 为电网侧的次同步电流; i_{vsc} 为受控电流源,位于SSR-DS所在支路。 i_1, i_2, i_{sub} 和 i_g 均可作为SSR-DS的控制信号,控制信号的选择需要考虑易监测性和信号传输的延迟,本文选择 i_{sub} 作为SSR-DS的控制信号。

当SSR-DS接于风电场群和电网之间的联络线上时,图5(a)所示等值电路的一般形式即退化为图5(b)所示的电路。阻尼控制环节的传递函数是拉普拉斯域的,而将时域转换到拉普拉斯域更容易实现,因此将等值阻抗换算为相应频率下的等值电阻、电感和电容,列写时域方程后,再将微分算子用拉普拉斯算子 s 替换即可开展分析。

图5(b)所示电路的方程列写如下:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{u}_{cg}}{dt} = \frac{1}{\tilde{C}_g} i_{sub} \\ \frac{di_1}{dt} = -\frac{1}{L_{wf}} (\tilde{u}_{cg} + \tilde{R}_g i_{sub} + R_{wf} i_1 + \tilde{u}_g) \\ i_{sub} = i_1 + i_{vsc} \end{cases} \quad (7)$$

以 i_{sub} 为控制信号,经过次同步电流提取环节和阻尼控制后SSR-DS电流的一般形式为:

$$i_{vsc} = K_1 G(s) i_{sub} \quad (8)$$

其中, $K_1 G(s)$ 为次同步电流提取环节和阻尼控制环节的传递函数的乘积。

将微分算子替换后,联立式(7)和式(8),并消去 u_{cg}, i_1 与 i_{vsc} ,那么关于 i_{sub} 有如下形式的线性齐次微分方程:

$$-K_1 G(s) (L_{wf} \tilde{C}_g s^2 + R_{wf} \tilde{C}_g s) i_{sub} + L_{wf} \tilde{C}_g s^2 i_{sub} + (R_{wf} + \tilde{R}_g) \tilde{C}_g s i_{sub} + i_{sub} = 0 \quad (9)$$

式(9)包括 $f_1 = -K_1 G(s) (L_{wf} \tilde{C}_g s^2 + R_{wf} \tilde{C}_g s) i_{sub}$ 和 $f_2 = L_{wf} \tilde{C}_g s^2 i_{sub} + (R_{wf} + \tilde{R}_g) \tilde{C}_g s i_{sub} + i_{sub}$ 这2个部分,其中 f_2 是未加装SSR-DS时 i_{sub} 的系统自由响应部分, f_1 是 i_{sub} 中由SSR-DS引入的自由响应部分。

由图5(b)和式(9)可知,未加装SSR-DS时,次同步电流的响应方程为 $f_2 = 0$,即:

$$L_{wf} \tilde{C}_g s^2 i_{sub} + (R_{wf} + \tilde{R}_g) \tilde{C}_g s i_{sub} + i_{sub} = 0 \quad (10)$$

则系统的次同步电流响应为:

$$i_{sub} = I e^{\alpha' t} \cos(\omega_d t + \theta) \quad (11)$$

其中, $\alpha' = \frac{R_{wf} + \tilde{R}_g}{2L_{wf}}; \omega_d = \sqrt{\frac{1}{L_{wf} \tilde{C}_g} - (\alpha')^2}$ 为衰减角频率; I 和 θ 分别为次同步电流的幅值和初相角。

由式(1)和式(2)可知 $R_{wf} + \tilde{R}_g < 0$,因此 $\alpha' < 0$,SSR振荡发散,发散速度取决于 α' 的大小。

由上述分析并对比式(9)和式(10)可知,SSR-DS抑制双馈风电场SSR的根本原因在于破坏了原系统的谐振条件,其阻尼控制环节改变了次同步电流响应方程的阶数和系数,通过改变其特征根,改变了振荡模态及其阻尼。为了使次同步电流迅速衰减为0,实现抑制双馈风电场系统频率时变SSR的目的,需要满足下述2个条件:①设计阻尼控制环节的拓扑,通过设置合理的阻尼增益和移相角,使式(9)的特征根的实部均小于0,且具有较大的绝对值;②考虑风速和风机数目的变化,以及式(9)中的 $R_{wf}, L_{wf}, \tilde{C}_g$ 和 $\tilde{R}_g$ 随之变化的特性,寻找阻尼增益和移相角的有效参数域,满足所有边界方程的特征根实部均小于0。

上述抑制作用分析主要针对采用静止 abc 坐标的附加电流控制的VSC,但也适用于单 d 轴、单 q 轴或 dq 轴对称同控的基于旋转 dq 坐标的附加电流控制的VSC。列写输出电流与控制信号之间的传递函

数,从 dq 坐标系变换至静止 abc 坐标系后,考虑注入的次同步电流即可,但需兼顾超同步电流对系统的影响。

在实际工程中,风机众多且网络拓扑复杂,难以用特征值分析、阻抗扫描或根轨迹法进行阻尼控制参数的理论分析与设计,且 SSR-DS 物理装置的通信、延时和调制环节均会影响阻尼控制参数的有效性,因此当计及工程可靠性、考虑 v_w 和 n 变化的影响时,可以采取多工况数字-物理实验的方法寻找阻尼控制的有效参数域,优化其参数鲁棒性。本文所研究 SSR-DS 的阻尼控制参数优化设计即基于该方法展开。

3 抑制环节关键参数的设计与分析

利用沽源风电场的风机与电网的等值参数(详见文献[22]),开展 SSR-DS 的关键参数设计与分析。

沽源风电场的 SSR 频率范围为 6~9 Hz,综合考虑风电场远期工程规划对次同步振荡特性的影响,拟抑制的 SSR 频率范围确定为 4~12 Hz。

3.1 次同步电流提取滤波器

本文采用 2 阶巴特沃斯低通滤波器和 4 阶巴特沃斯带阻滤波器串联来提取次同步电流。其中,低通滤波器的截止频率为 90 Hz,带阻滤波器的阻带频率范围为 46~56 Hz,应用 MTALAB 设计传递函数参数,对应的伯德图如图 6 所示(图中幅值为数值,表征跟踪能力,无单位)。

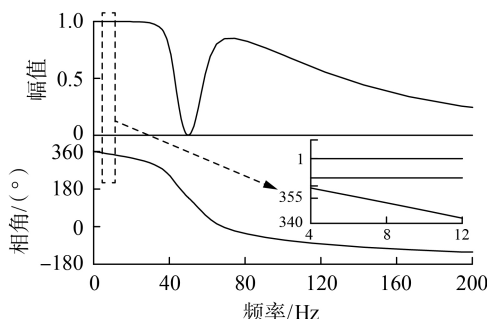


图 6 次同步电流提取滤波器伯德图

Fig.6 Bode diagram of extraction filter for sub-synchronous current

在 PSCAD 平台中搭建模型加以验证。其中,设置 50 Hz 工频分量的幅值 $M_i=2$; i_h 用于模拟谐波分量,幅值 $M_{ih}=0.5$ 、频率 $f_{ih}=250$ Hz; i_s 用于模拟频率时变的次同步分量,设置幅值 $M_{is}=1$,频率以 1 Hz 的步长每隔 0.5 s 变化一次,变化范围为 4~12 Hz;上述 3 种分量的初相位均设为 0° 。图 7 对比了 i_s 和提取所得次同步电流信号 i_{sout} ,并且分别局部放大了 4、8、12 Hz 的所处时间段(图中纵轴为数值,表征跟踪能力,无单位)。

图 6 和图 7 表明,次同步电流提取环节能有效滤

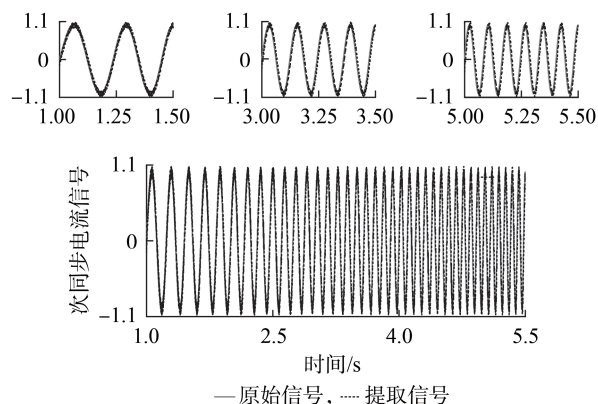


图 7 次同步电流提取信号与原始信号对比

Fig.7 Comparison between sub-synchronous current extraction signal and original signal

除工频和谐波分量,而对于 4~12 Hz 次同步频率分量的影响较小,能快速跟踪频率变化,幅值误差极小,相位误差随频率的增大会有所增大,实验结果验证了本文所设计的次同步电流提取方法适用于 4~12 Hz 的宽频带,快速且准确。

3.2 阻尼控制参数

装置采用 42 个 IGBT 模块级联构成多电平 VSC,容量为 10 Mvar。设计主电路参数后,调整并确定 VSC 的运行控制参数,使直流电容电压指标和输出电流误差达到要求。

为了实现 SSR-DS 阻尼控制参数对于 4~12 Hz 宽频带的双馈风电场 SSR 均可有效抑制,在数字-物理闭环仿真环境(仿真平台详见第 4 节)下,采用下述步骤确定最优阻尼控制参数:

- (1) 确定主要因素的组合工况集;
- (2) 分别设置 K_{dam} 和 φ_m 的上限、下限及步长,配组参数对 (K_{dam}, φ_m) 形成参数域;
- (3) 在某一工况下开展闭环仿真实验,观测并记录不同的参数对 (K_{dam}, φ_m) 下汇集线次同步电流的收敛时间,确定收敛参数域;
- (4) 综合全部工况的收敛参数域,重叠区即为能满足频率时变工况的有效参数域。

考虑风速、风机数目及线路投切的不同运行工况组合,风速的范围为 5~8 m/s,风机数目的范围为 0~120% (风机数目 120% 模拟远期,0 代表某一风电场切出); K_{dam} 的范围为 3~6; φ_m 的范围为 $-15^\circ \sim 40^\circ$ 。选取 3 种工况下的阻尼控制参数实验结果进行说明。4、8、12 Hz 工况下不同参数对 (K_{dam}, φ_m) 下的次同步电流的收敛时间 t_c 分别如表 1 和附录中的表 A1、A2 所示。

由表 1 和附录中表 A1、A2 可知:①较大的增益 K_{dam} 和较大的超前补偿相位可能引起抑制装置与系统之间发生负交互影响,但控制器的输出限幅会使 SSR-DS 的输出电流受限,实际运行中应该避免装

表 1 4 Hz 工况下不同参数对对应的收敛时间

Table 1 Convergence times corresponding to different parameter groups under condition of 4 Hz

$\varphi_m / (^{\circ})$	t_c / s				
	$K_{\text{dam}}=3$	$K_{\text{dam}}=4$	$K_{\text{dam}}=5$	$K_{\text{dam}}=5.3$	$K_{\text{dam}}=6$
40	—	—	—	—	—
30	—	—	—	—	—
20	1.4	0.63	—	—	—
15	1.6	0.76	—	—	—
10	2.5	0.85	0.5	0.42	—
0	3.8	1.20	0.8	发散	发散
-5	发散	3.00	1.4	发散	发散
-15	发散	发散	3.3	发散	发散

注：“—”表示 SSR-DS 的输出电流受限，工作在额定电流状态。

置运行在该区域；②较小的滞后相位补偿下，装置提供的阻尼较弱，不能有效地抑制 SSR；③恰当的比例放大系数以及相位补偿下，SSR-DS 能够提供较强的阻尼，可使次同步电流较快收敛，如表中阴影区域所示。

多种工况下的仿真结果表明，尽管不同条件下的有效参数域不尽相同，但特性基本一致。综合各种工况下闭环仿真实验的收敛参数域，结果表明： $K_{\text{dam}} \in [3, 5]$ 、 $\varphi_m \in [5^{\circ}, 10^{\circ}]$ 为公共的有效阻尼控制参数域，在该参数域下 SSR-DS 能够对双馈风电场频率时变的 SSR 取得较好的抑制效果。

4 数字-物理闭环实验验证

取阻尼控制参数 $K_{\text{dam}}=5$ 、 $\varphi_m=10^{\circ}$ 来验证 SSR-DS 的有效性与动态性能，数字-物理闭环实验仿真平台如附录中的图 A1 所示。沽源双馈风电系统用 6 座等值风电场模拟，在 RSCAD 软件中以数字仿真模型实现，SSR-DS 采用实际的物理控制器，两者通过 RTDS 仿真系统相连接。实验结果验证了不同风速和不同风机数目下装置的抑制效果。

4.1 SSR 抑制功能的验证

改变风速和风机数目构造不同频率的 SSR，其中频率分别为 3.5、8.0、12.0 Hz 的 SSR 工况组合如表 2 所示。检测汇集线上的电流并进行 FFT 分析，3 种工况下 SSR 的抑制结果分别如图 8—10 所示。

观察图 8—10 知，通过阻尼控制参数的优化设计，对于目标频率范围内的 SSR 而言，安装 SSR-DS 后，次同步电流均由发散变为收敛，结果表明：①抑制装置有效增强了双馈风电输送系统的阻尼，与抑制作用分析一致；②抑制带宽可达 4~12 Hz，SSR-DS 可有效地抑制风速和风机数目变化引起的频率时变的 SSR，满足设计要求。

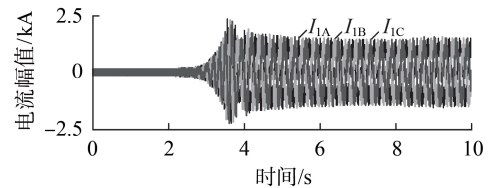
4.2 SSR 抑制动态性能的验证

在 SSR 被抑制的状态下，连续改变风速和风机数目，检测 SSR-DS 的动态性能。其中，在风速减小的实验中，风机数目设定为 20%；在风机数目减小

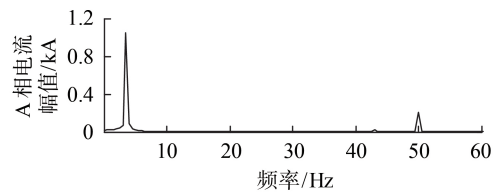
表 2 SSR 工况组合

Table 2 Condition combinations of SSR

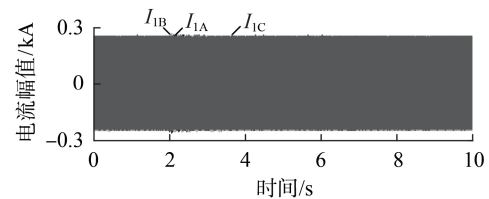
工况	频率 / Hz	风速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风机数目 / %	风电场情况
1	3.5	6	20	风电场 5 切出
2	8.0	7	100	风电场全投
3	12.0	8	120	风电场全投



(a) SSR 发生时汇集线电流



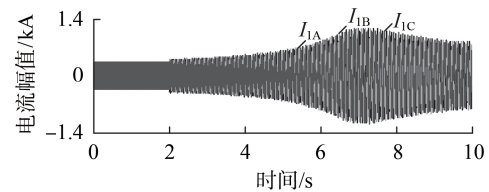
(b) SSR 发生时汇集线 A 相电流频谱



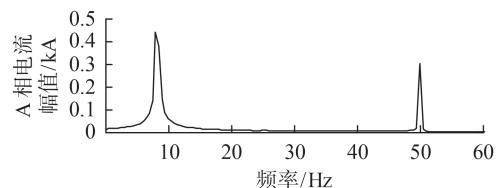
(c) 抑制后的汇集线电流

图 8 工况 1 下 SSR 的抑制结果

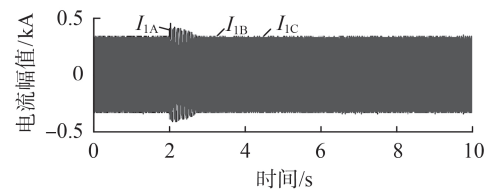
Fig.8 Suppression results of SSR under Condition 1



(a) SSR 发生时的汇集线电流



(b) SSR 发生时的汇集线 A 相电流频谱



(c) 抑制后的汇集线电流

图 9 工况 2 下 SSR 的抑制结果

Fig.9 Suppression results of SSR under Condition 2

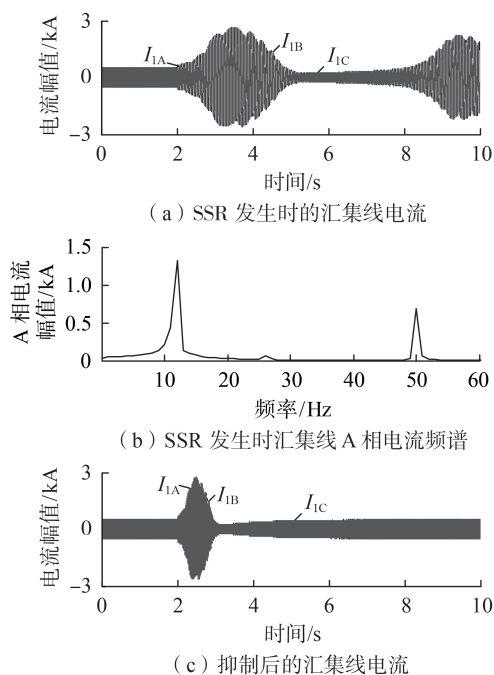


图 10 工况 3 下 SSR 的抑制结果

Fig.10 Suppression results of SSR under Condition 3

的实验中,风速设定为 5 m/s。观测风速和风机数目改变情况下的汇集线有功功率,结果分别如图 11 和图 12 所示。

根据文献[19]的研究,对于双馈风电输送系统而言,在低风速下其较易发生 SSR,风机数目变化也会对系统的阻尼产生影响。观察图 11 可以看出,随着风速的减小,汇集线有功功率平稳减小,没有再次发生 SSR;观察图 12 可以看出,随着风机数目的减小,汇集线有功功率平稳减小,没有再次发生 SSR。实验结果表明,本文所提宽频带 SSR-DS 的动态性能良好,能够有效地抵御风速以及风机数目变化的干扰。

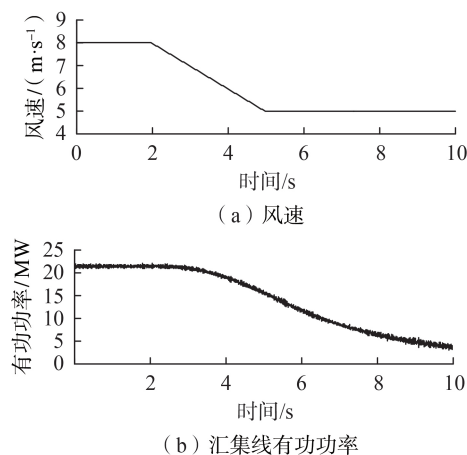


图 11 风速减小时的 SSR 抑制结果

Fig.11 Suppression result of SSR with decreasing wind speed

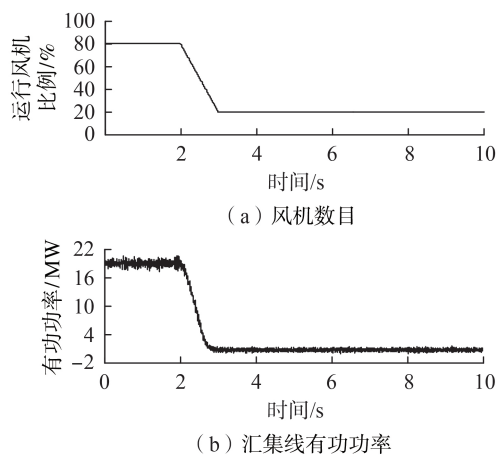


图 12 风机数目减少时的 SSR 抑制结果

Fig.12 Suppression result of SSR with decreasing number of DFIG

5 结论

针对双馈风电系统的 SSR 频率时变的特性,本文的主要贡献在于:①研制了基于 VSC 的宽频带 SSR 抑制装置,将其安装于风电集群的汇集线上,结合工程的数字-物理实验结果表明了该装置对于抑制双馈风电 SSR 的有效性;②给出了分析并联 VSC 抑制双馈风电 SSR 作用的等值电路的一般形式和简化形式,通过次同步电流的响应方程阐明了其抑制作用。所得主要结论如下:

(1)将 SSR-DS 等效为受控源,其抑制 SSR 的原理在于,阻尼控制环节改变了次同步电流自由响应方程的阶数和系数,进而改变了系统的振荡模态及其阻尼;

(2)准确提取动态的次同步模态、提高阻尼控制参数的鲁棒性是采用 FACTS 装置抑制频率时变的 SSR 的关键。

结合智能化的次同步模态识别算法和自适应控制策略能有效提高基于 VSC 的 SSR 抑制装置的抑制精度和鲁棒性,这将是后续的研究重点。

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] 任佳佳,胡应宏,纪延超. 基于 $\alpha\beta$ 坐标系下双馈异步风力发电机串补输电系统次同步谐振的比例谐振控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):90-95.
REN Jiajia, HU Yinghong, JI Yanchao. PR control of sub-synchronous resonance in DFIG connected to series compen-

- sated power transmission system based on $\alpha\beta$ axis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 90-95.
- [3] NARENDRA K, FEDIRCHUK D, MIDENCE R, et al. New microprocessor based relay to monitor and protect power systems against sub-harmonics[C]//2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference. Winnipeg, MB, Canada: IEEE, 2011: 438-443.
- [4] 董晓亮, 谢小荣, 韩英铎, 等. 基于定转子转矩分析法的双馈风机次同步谐振机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4861-4869.
- DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, HAN Yingduo, et al. Mechanism study of DFIG-related SSR based on separate stator and rotor torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4861-4869.
- [5] XIE X R, ZHANG X, LIU H K, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126.
- [6] 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.
- [7] 王亮, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 大规模双馈风电场次同步谐振的分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 26-31.
- WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Analysis and mitigation of SSR problems in large-scale wind farms with doubly-fed wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 26-31.
- [8] 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]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [9] FAN L L, MIAO Z X. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 349-358.
- [10] 高本锋, 李忍, 杨大业, 等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-20.
- GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20.
- [11] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场阻尼系统次同步振荡的无功功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 19-25.
- LI Hui, CHEN Yaojun, ZHAO Bin, et al. Reactive power control of sub-synchronous oscillation damping system for DFIG-based wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 19-25.
- [12] 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.
- [13] 张宋彬, 江全元, 陈跃辉, 等. 含DFIG风机的电力系统次同步谐振附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 36-43.
- ZHANG Songbin, JIANG Quanyuan, CHEN Yuehui, et al. Design of additional SSR damping controller for power system with DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 36-43.
- [14] 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.
- [15] WANG L, XIE X R, LIU X D, et al. Centralised solution for subsynchronous control interaction of doubly fed induction generators using voltage-sourced converter[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2751-2759.
- [16] 罗超. 次同步振荡动态抑制器控制策略与工程应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- LUO Chao. Research on control strategy and engineering application of subsynchronous oscillation dynamic suppressor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [17] 高澈, 张剑. 基于并联电压源型换流器的次同步振荡抑制策略研究[J]. 电力建设, 2017, 38(10): 48-55.
- GAO Che, ZHANG Jian. Sub-synchronous oscillation control strategy based on parallel voltage sourced converter[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(10): 48-55.
- [18] 廖坤玉, 陶顺, 姚黎婷, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4886-4897, 4994.
- LIAO Kunyu, TAO Shun, YAO Liting, et al. Study on frequency-domain modeling and time-varying characteristics of DFIG input impedance with excitation under static reference frame[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4886-4897, 4994.
- [19] 董晓亮, 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 subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 189-193.
- [20] MIAO Z X. 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.
- [21] CESPEDES M, SUN J. Modeling and mitigation of harmonic resonance between wind turbines and the grid[C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [22] 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.

作者简介:



廖坤玉

廖坤玉(1989—),男,河南许昌人,博士研究生,主要研究方向为新能源电能质量、次同步振荡等(E-mail: lky@ncepu.edu.cn);

肖湘宁(1953—),男,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统次同步振荡、现代电能质量、电力电子技术应用(E-mail: xxn@ncepu.edu.cn)。

Effect analysis and experiment of broadband sub-synchronous resonance suppression of DFIG-based wind farm groups based on VSC

LIAO Kunyu¹,XIAO Xiangning¹,LUO Chao²,TAO Shun¹,YANG Zhichao¹,

YU Hongyang³,LIU Zongye³,LIU Hui⁴

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. Electric Power Research Institute,CSG,Guangzhou 510080,China;

3. Global Energy Interconnection Research Institute,Beijing 102209,China;

4. Electric Power Research Institute,State Grid Jibei Electric Power Co.,Ltd.,Beijing 100045,China)

Abstract: The SSR (Sub-Synchronous Resonance) frequency of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)-based wind farm is broadband and time-varying, which brings difficulties to its suppression. Thus, based on the parallel VSC (Voltage Source Converter) technology, the suppression device of broadband SSR for DFIG-based wind farm groups is designed, which is installed on the assemble line of wind farm groups. The suppression device is equivalent to a controlled source, the general form and simplified form of equivalent circuit for analyzing the suppression effect of the device on the SSR of DFIG-based wind farm are given, and the suppression effect is revealed through the response equation of the sub-synchronous current. The sub-synchronous current of the assemble line is measured as the feed-in signal, the oscillation modes are extracted by using the broadband filter and phase compensation scheme, whose amplitude and phase are adjusted, then the sub-synchronous damping current is injected into the system, suppressing SSR by increasing the system damping. Experimental results of digital-physical closed loop simulation under different working conditions show that through parameter optimization design, the device can quickly and accurately detect the broadband SSR signal and realize effective suppression, so as to solve the time-varying SSR of large-scale wind farm groups.

Key words: DFIG-based wind farm groups; voltage source converter; time-varying frequency; broadband sub-synchronous resonance; resonance suppression; effect analysis; digital-physical closed loop simulation

附录

表 A1 8 Hz 工况下不同参数对对应的收敛时间

Table A1 Convergence times corresponding to different parameter groups under condition of 8 Hz

$\varphi_m/(^{\circ})$	t_c/s				
	$K_{dam}=3$	$K_{dam}=4$	$K_{dam}=5$	$K_{dam}=5.3$	$K_{dam}=6$
40	—	—	—	—	—
30	0.95	—	—	—	—
20	0.99	0.50	—	—	—
15	1.02	0.63	0.32	—	—
10	1.90	0.71	0.58	0.30	—
0	3.50	2.80	2.50	1.80	发散
-5	发散	发散	发散	发散	发散
-15	发散	发散	发散	发散	发散

注：表中的“—”表示 SSR-DS 的输出电流受限，工作在额定电流状态，后同。

表 A2 12 Hz 工况下不同参数对对应的收敛时间

Table A2 Convergence times corresponding to different parameter groups under condition of 12 Hz

$\varphi_m/(^{\circ})$	t_c/s				
	$K_{dam}=3$	$K_{dam}=4$	$K_{dam}=5$	$K_{dam}=5.3$	$K_{dam}=6$
40	0.41	—	—	—	—
30	0.57	0.37	—	—	—
20	0.63	0.45	—	—	—
15	0.83	0.56	0.43	—	—
10	1.67	0.95	0.75	0.33	—
5	2.90	2.60	2.40	2.10	—
0	发散	发散	发散	发散	发散
-5	发散	发散	发散	发散	发散

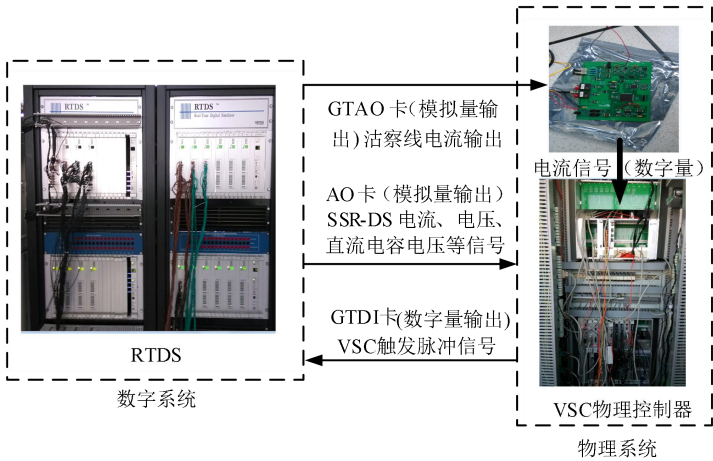


图 A1 数字-物理闭环实验仿真平台

Fig.A1 Digital-physical closed-loop experimental simulation platform