

基于附加频变增益控制的风电-柔性直流输电系统次同步振荡抑制方法

李景一^{1,2}, 李浩志², 尹聪琦², 谢小荣², 杨建军¹, 王克¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311112;

2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:针对风电-柔性直流输电系统动态相互作用引发的次同步振荡(SSO)问题,提出了一种基于附加频变增益(SFDG)控制的SSO抑制策略。基于阻抗理论揭示了风电-柔性直流输电系统SSO的发生机理;采用参数灵敏度分析从多个变流控制环节中优选出施加SFDG控制的施加位置;将SFDG控制设计规范为多工况约束优化问题并求解实现其参数优化;通过对比施加SFDG控制前、后系统聚合阻抗的频率特性变化,从理论上说明SFDG控制的原理和作用。通过电磁暂态仿真验证了单一和2个SFDG控制的SSO抑制效果。

关键词:风电-柔性直流输电系统;次同步振荡;附加频变增益控制;参数优化;振荡抑制

中图分类号:TM 614;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202011

0 引言

在风电-柔性直流(简称“柔直”)输电系统中,风电机组与柔直变流器经电力网络形成的控制相互作用会在一定的条件下引发次同步振荡SSO(Sub-Synchronous Oscillation)问题^[1-2],如我国广东南澳^[3]和上海南汇风电-柔直输电系统^[4]均报道过相关事故。振荡会引发高幅值的次同步频率分量,严重威胁设备的安全性和系统的稳定性^[5-6]。因此,深入研究风电-柔直输电系统SSO的发生机理并提出有效的抑制方法,对于保证风电-柔直输电系统的安全、稳定运行以及推动海上风电的健康发展具有重要的意义。

针对风电-柔直输电系统的SSO问题,已有研究主要分析了3类抑制方法,即协调整定风电机组与柔直变流器控制参数、针对风电与柔直变流器附加次同步阻尼控制以及安装抑制SSO的专用变流控制装置。在参数整定方面:文献[7]研究结果表明,优化柔直变流器电压外环的比例、积分增益能够降低风电-柔直输电系统的SSO风险,但是没有对风电机组变流控制环节及其参数进行分析;文献[8-9]研究结果表明,优化风电机组变流器内、外环控制以及柔

直整流侧变流控制的参数增益均可降低SSO风险,但是单纯修改参数增益会在改进次同步阻尼特性的同时,对工频响应特性产生影响^[10]。在附加次同步阻尼控制方面:文献[11]提出在柔直变流器的电流控制环上附加一个增益环节,相当于在柔直桥臂上产生一个“虚拟”电阻;文献[12]在柔直变流器的电流参考值前向通道上增加了一个针对次同步分量的比例谐振式控制。文献[11-12]所提方案均能提高次同步阻尼,但是没有关注风电机组侧变流器的抑制能力。文献[13-14]提出在柔直整流侧的有功、无功控制外环中附加次同步阻尼控制,基于特征根分析进行控制结构及参数设计,也讨论了在风电机组变流器中附加次同步阻尼控制的策略,但是并没有对风电与柔直变流控制各环节进行灵敏度分析,以优选出对次同步阻尼影响较大的环节。在安装抑制SSO的专用变流控制装置方面:文献[15-16]提出在风电-柔直输电系统中配置柔性交流输电系统FACTS(Flexible AC Transmission System)设备并进行次同步阻尼控制器设计,但没有考虑利用风电和柔直自身变流控制的振荡抑制能力,增加了工程造价。

针对上述问题,本文提出了一种基于附加频变增益SFDG(Supplementary Frequency Dependent Gain)控制的SSO抑制方法。该附加控制可等效改变风电机组与柔直变流控制参数在次同步频段的增益,在增强次同步阻尼能力的同时,不会影响原有控制的工频响应特性。首先,在基于阻抗理论揭示风电-柔直输电系统SSO机理的基础上,采用灵敏度分析优选出SFDG控制的施加位置;然后,将SFDG控制设计规范为非线性优化问题,并求解实现其参数优化;通过对比施加SFDG控制前、后系统聚合阻抗特性

收稿日期:2021-09-15;修回日期:2021-12-14

在线出版日期:2022-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51737007,51925701);清华大学-新南威尔士大学自主科研国际合作专项(2020Z02NSW);中国电建集团华东勘测设计研究院科技项目(KY2020-XNY-02-02)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51737007,51925701),Tsinghua-UNSW Initiative Scientific Research Program(2020Z02NSW) and the Science and Technology Project of Power China Huadong Engineering Corporation Limited(KY2020-XNY-02-02)

曲线,阐明了SFDG控制的工作原理;最后,通过电磁暂态仿真验证了所提基于SFDG控制的SSO抑制效果。

1 风电-柔直输电系统及SSO机理

1.1 风电-柔直输电系统及其控制策略

本文研究的风电-柔直输电系统拓扑结构图如图1所示。风电场安装了500台2 MW的双馈风电机组,总容量为1000 MW。双馈风电机组模型主要包括异步发电机、风电机组变流器及其控制、风力机及其控制。由于本文研究主要考虑风电机组与柔直变流控制交互作用引发的SSO,可忽略风电机组之间的相互作用,近似假设各风电机组的参数及运行状态一致^[9],具体参数见附录A表A1。柔直变流器的额定容量为1000 MW,采用模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)结构,电平数为264,桥臂电感值为0.105 H,子模块电容值为8000 μ F,直流电压为 ± 500 kV。为了简化建模且不影响系统特性,在建模时将220 kV线路及变压器参数折算到500 kV侧。

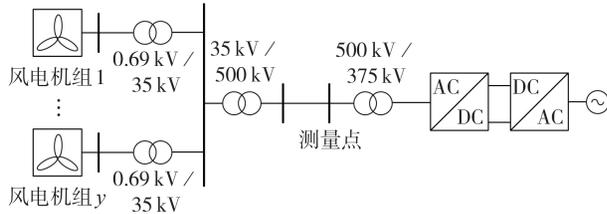


图1 风电-柔直输电系统拓扑结构图

Fig.1 Topology structure diagram of wind power-flexible DC transmission system

风电机组变流器的控制在 dq 坐标系下实现,其中转子侧变流器(RSC)控制框图如附录A图A1所示,用于调节风电机组的有功输出和机端电压;网侧变流器(GSC)控制框图如附录A图A2所示,用于维持直流电容电压和网侧无功功率。风电-柔直输电系统的柔直送端变流器采用电压/频率控制,控制框图如附录A图A3所示。上述风电机组和柔直输电系统各控制回路的参数初始值设定如附录A表A2所示。

1.2 SSO问题及其机理

采用阻抗模型分析图1所示风电-柔直输电系统的SSO机理。风电-柔直输电系统的阻抗网络见附录A图A4,包括双馈风电机组阻抗 Z_w 、箱变阻抗 Z_T 、汇集变阻抗 Z_{T11} 、线路阻抗 Z_L 、换流变阻抗 Z_{T12} 以及柔直侧阻抗 Z_{MMC1} ,可通过机理推导法或者扰动测试法得到各阻抗矩阵,其中双馈风电机组和柔直侧阻抗矩阵的阶数分别为11阶和16阶^[9,17-18]。

根据附录A图A4所示的阻抗网络,采用阻抗聚合方法可以分别得到测量点往风电场侧的阻抗矩阵 Z_w 和测量点往柔直变流器侧的阻抗矩阵 Z_{MMC} ^[18],从而可得系统的聚合阻抗矩阵 Z_Σ 为:

$$Z_\Sigma = Z_w + Z_{MMC} = \begin{bmatrix} Z_{\Sigma 11} & Z_{\Sigma 12} \\ Z_{\Sigma 21} & Z_{\Sigma 22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $Z_{\Sigma 11}$ 、 $Z_{\Sigma 12}$ 、 $Z_{\Sigma 21}$ 、 $Z_{\Sigma 22}$ 为聚合阻抗矩阵的元素。

聚合阻抗矩阵 Z_Σ 的行列式为:

$$D_z(s) = |Z_\Sigma| = Z_{\Sigma 11} Z_{\Sigma 22} - Z_{\Sigma 12} Z_{\Sigma 21} \quad (2)$$

从而可以得到等效电抗 $X_D = \text{Im}\{D_z(j\omega)\}$ (其中 ω 为角频率),等效电阻 $R_D = \text{Re}\{D_z(j\omega)\}$,绘制其频率特性曲线如图2所示。由图可见,等效电抗在次同步频率范围内有1个过零点,根据文献[19]中的判据,若等效电抗 X_D 存在过零点且相应的 $k_{X_D}(\omega_r)R_D(\omega_r) < 0$ (k_{X_D} 为等效电抗斜率, ω_r 为等效电抗过零点时对应的角频率),则振荡模式不稳定,可以得知系统在15.68 Hz附近存在不稳定的振荡模式。相应的电路机理解释如下:等效电抗在过零点附近从感性过渡为容性,相当于等效电感和等效电容的串联电路在过零点处产生了一个谐振模式,而对应该模式的等效电阻小于0,从而构成了一个负阻尼的RLC电路,导致不稳定的SSO。而抑制该SSO模式的基本逻辑为:采用SFDG控制改变聚合阻抗行列式在该过零点附近的等值阻抗,增加等效阻尼,以消除造成上述不稳定振荡的条件。

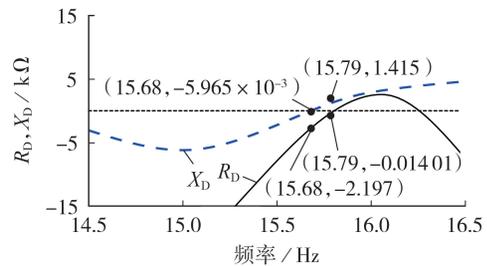


图2 聚合阻抗行列式的频率特性

Fig.2 Frequency characteristics of polymerization impedance's determinant

2 基于灵敏度分析的SFDG控制位置选择

为了优选SFDG控制的施加位置,首先需要分析变流控制环节各参数对次同步稳定性的影响情况。由此,引入灵敏度参数 S ,其计算式为:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S^k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\partial \sigma_s^k}{\partial M_{cl}^k} \quad (3)$$

式中: S^k 为工况 k 下计算得到的灵敏度; M_{cl}^k 为工况 k 下的控制器参数,控制器参数变化会引起阻抗特性发生变化; σ_s^k 为工况 k 下风电-柔直输电系统SSO模式的阻尼系数,其值为正表示系统振荡收敛,其值为

负表示振荡不稳定, σ_s^k 及其关于控制器参数的偏导数可以基于聚合阻抗矩阵 Z_s 计算得到; n 为工况数量。计算灵敏度时考虑各个工况计算结果的平均值, 且不同工况考虑了风速、并网风电机组数量等因素的变化。

进一步给出式(3)中阻尼系数 σ_s 及其关于控制器参数 M_{cl} 偏导数的计算过程。式(1)所示风电-柔直输电系统的聚合阻抗在发生振荡的角频率 ω_r 附近可以用一个二阶 RLC 电路进行代替^[18], 其阻抗表达式 $Z(\omega)$ 为:

$$Z(\omega) = AZ_{RLC}(\omega, R, L, C) \Big|_{\omega \in [\omega_r - \Delta\omega, \omega_r + \Delta\omega]} \quad (4)$$

式中: A 为复增益系数; Z_{RLC} 为角频率 ω_r 邻域 $[\omega_r - \Delta\omega, \omega_r + \Delta\omega]$ 内的阻抗; R, L, C 分别为等效电阻、等效电感、等效电容。参数 A, R, L, C 可以通过曲线拟合得到。

基于求得的参数 R, L, C , 根据式(5)可计算得到阻尼系数 σ_s 。

$$\sigma_s = \frac{R}{2L} \quad (5)$$

在工况 k 下, 控制器参数 M_{cl}^k 在 $\Delta\delta$ 邻域范围内变化, 阻尼系数 σ_s^k 相应地发生变化, 进而给出灵敏度 S^k 的计算表达式为^[20]:

$$S^k = \frac{\partial \sigma_s^k}{\partial M_{cl}^k} \approx \lim_{\Delta\delta \rightarrow 0} \frac{\sigma_s^k(M_{cl}^k + \Delta\delta) - \sigma_s^k(M_{cl}^k)}{\Delta\delta} \quad (6)$$

按照上述计算过程计算其余 $n-1$ 个工况的灵敏度值并求和取平均值, 即可得到控制器参数 M_{cl} 的灵敏度 S 。

风电机组和柔直输电系统各控制参数的灵敏度计算结果如附录 A 表 A2 中的灵敏度 1 所示。当灵敏度结果为正时, 随着 M_{cl} 增大(减小), σ_s 也逐渐增大(减小), 其增大(减小)的程度与灵敏度成正比; 当灵敏度结果为负时, 随着 M_{cl} 增大(减小), σ_s 逐渐减小(增大), 其减小(增大)的程度与灵敏度的绝对值成正比。由表 A2 中灵敏度 1 的计算结果可以知道, 风电机组 RSC 无功功率控制器传递函数 $G_{rq}(s)$ 比例增益 K_{pq} 的灵敏度为 20.971, 可见其对次同步阻尼系数的影响程度最大, 所以优先在这一环节施加 SFDG 控制。

优选位置的机理解释如下: RSC 主要控制有功功率、机端电压/无功功率, GSC 主要控制直流电压与 GSC 输出无功; 由于 GSC 容量相对较小, RSC 的受控对象(有功功率、机端电压/无功功率)与柔直输电系统之间的耦合程度更大, 而柔直输电系统采用交流电压控制, 因此 RSC 的电压/无功功率控制与柔直输电系统的交互作用更强, 其对系统 SSO 特性的影响更大。

3 SFDG 控制的设计及阻抗模型验证

3.1 控制参数设计

根据上述灵敏度分析结果, 为了等效改变 K_{pq} 但又不影响其工频响应特性, 考虑在该环节施加 SFDG 控制。施加 SFDG 控制后 RSC 的无功功率控制结构如图 3 所示。图中: V_{RMS}, V_{ref} 分别为电压有效值及其参考值; Q_r, Q_{ref} 分别为无功功率及其参考值; i_{qr1}, i_{qr2} 分别为无功功率控制器、SFDG 控制的输出电流; i_{rq} 为 q 轴无功电流; v_{rq} 为电流控制器的输出; $G_{rac}(s), G_{ri}(s)$ 分别为电压控制器、电流控制器的传递函数; $G_{rq-SFDG}(s)$ 为 SFDG 控制的传递函数, 如式(7)所示。

$$G_{rq-SFDG}(s) = K_{rq-SFDG} \frac{s/\omega_c}{1 + 2\xi s/\omega_c + (s/\omega_c)^2} \quad (7)$$

式中: $K_{rq-SFDG}$ 为 SFDG 控制的比例增益; ω_c 为中心角频率; ξ 为阻尼比。

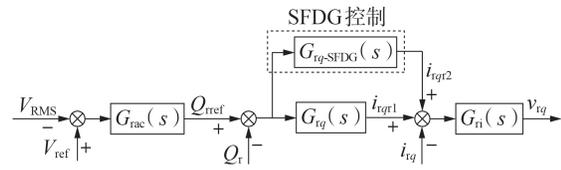


图3 施加 SFDG 控制后 RSC 的无功功率控制结构

Fig.3 Reactive power control structure of RSC with SFDG control

3.2 参数设计方法

为了保证不同工况下风电-柔直输电系统 SSO 的稳定性, 提高 SFDG 控制的鲁棒性, 结合阻抗模型对 SFDG 控制的比例增益 $K_{rq-SFDG}$ 和阻尼比 ξ 进行优化设计。考虑到不同 SFDG 控制参数会影响风电-柔直输电系统的阻抗特性, 进而影响 SSO 阻尼系数 σ_s 。将 SFDG 控制参数的设计规范为多工况约束优化问题, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \max F = \min \{ \sigma_s^1, \sigma_s^2, \dots, \sigma_s^n \} \\ \text{s.t. } K_{rq-SFDG1} < K_{rq-SFDG} < K_{rq-SFDGh}, \xi_1 < \xi < \xi_h \end{cases} \quad (8)$$

式中: F 为优化目标函数; $K_{rq-SFDGh}, K_{rq-SFDG1}$ 分别为比例增益 $K_{rq-SFDG}$ 的上、下限; ξ_h, ξ_1 分别为阻尼比的上、下限。对于此类非线性优化问题, 可以采用遗传模拟退火算法程序进行求解^[21], 具体求解步骤本文不再赘述。求解优化问题式(8)可得到 SFDG 控制的比例增益和阻尼比参数。

需要说明的是, 针对单一环节施加的 SFDG 控制可能难以保证系统在不同风电场出力情况下的稳定性, 进而需要采用多个 SFDG 控制。譬如: 在 RSC 无功功率控制器的比例增益 K_{pq} 环节施加 SFDG 控制后, 控制结构将发生改变, 进而造成各控制参数的灵敏度也会发生变化。因此, 当需要增加新的 SFDG

控制时,需要重新计算灵敏度来优选施加位置,并再次按照上述参数优化方法设计参数取值。换言之,多个 SFDG 控制需要采用“顺序(sequential)”方法进行优化设计。

3.3 控制效果的阻抗模型分析

施加 SFDG 控制之后,重新绘制风电-柔直输电系统聚合阻抗行列式的频率特性,如图 4 所示。对比图 2 和图 4 可知:SFDG 控制改变了系统的阻抗特性;施加 SFDG 控制之后等效电抗过零点处 $k_{X_D}(\omega_r)R_D(\omega_r)>0$,根据稳定判据可知,施加控制前的不稳定振荡被抑制。进一步观察可知,所设计的 SFDG 控制改变了系统聚合阻抗行列式的频率特性,在等效电抗过零点处使 $R_D(\omega_r)>0$,增加了系统的阻尼能力,消除了施加控制前引发不稳定振荡的条件。

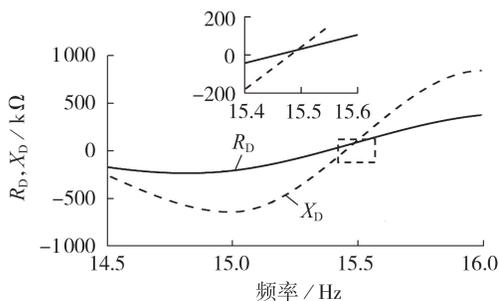


图 4 施加 SFDG 后聚合阻抗行列式的频率特性
Fig.4 Frequency characteristics of polymerization impedance's determinant with SFDG control

4 电磁暂态仿真验证

在 PSCAD / EMTDC 软件中搭建图 1 所示风电-柔直输电系统,通过电磁暂态仿真验证 SFDG 控制抑制 SSO 的效果。

4.1 无 SFDG 控制的情况

无 SFDG 控制时的仿真结果如图 5 所示。0.5 s 时风电机组开始逐步并网,逐级增加并网风电机组的数量,到 1.5 s 时并网机组数量达到 50 台,即风电场出力为 100 MW,此时出现功率振荡发散的情况,阻尼比为 0.009 9,衰减系数为 2.164,风电机组的输出电流中存在明显的次同步频率分量,最大幅值达到基波电流幅值的 103%,这表明系统发生不稳定的 SSO。

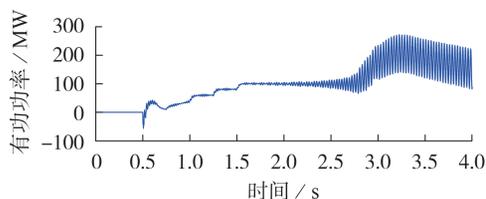


图 5 无 SFDG 控制时的仿真结果
Fig.5 Simulative results without SFDG control

4.2 施加单一 SFDG 控制的情况

首先需要验证基于阻抗模型优选所得施加 SFDG 控制位置的正确性。仿真分析 SSO 衰减系数 α 随各环节控制参数的变化情况,并根据式(9)计算影响系数 ρ 。

$$\rho = \frac{\Delta\alpha}{\Delta M_{cl}} = \left| \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{M_{cl,i+1} - M_{cl,i}} \right| \quad (9)$$

式中: N 为仿真数据数量; $\Delta\alpha$ 为衰减系数扰动量; ΔM_{cl} 为控制器参数扰动量; $\alpha_i, M_{cl,i}$ 分别为仿真数据 i 对应的衰减系数、控制器参数; $\Delta\alpha/\Delta M_{cl}$ 反映了控制器参数对 SSO 的影响程度。通过对仿真波形进行 Prony 计算得到:当 $\alpha>0$ 时,系统振荡发散;当 $\alpha<0$ 时,系统振荡衰减。部分工况下 $\Delta\alpha/\Delta M_{cl}$ 的计算结果见附录 A 表 A3,重点给出了反映控制器参数对 SSO 的影响程度较大的计算结果。由计算结果可知,RSC 无功功率控制器的比例增益 K_{pq} 对 SSO 影响最大,影响系数 $\rho=7.18$,远大于其他环节参数的影响系数,与前文的理论分析结果一致。计算结果与理论数值存在差异的主要原因在于:理论分析求解的是极限值,仿真计算的是切线值,且理论分析时考虑的工况更多。

所以在 RSC 无功功率控制器比例增益环节施加 SFDG 控制,风电机组并网过程同 4.1 节,此时的仿真结果如图 6 所示。由图可以看出,当功率提升到 100 MW 时,没有出现 4.1 节中的功率振荡现象,且电流中也没有显著的次同步频率分量。更多的仿真结果表明,在该单一 SFDG 控制下,只要并网风电机组数量不超过 90 台,系统均能稳定运行,不会出现 SSO 发散的情况。

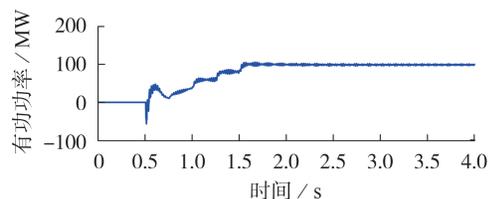


图 6 施加单一 SFDG 控制时的仿真结果
Fig.6 Simulative results with single SFDG control

4.3 施加 2 个 SFDG 控制的情况

对于 4.2 节中的仿真场景,若进一步增加风电机组的并网数量或功率,譬如当并网风电机组数量超过 90 台或功率超过 180 MW 后,系统中会再次出现不稳定的 SSO 问题。为了进一步增强抑制能力,需要再增补 SFDG 控制。为此,重复前述过程,即在 RSC 无功功率控制器比例增益环节施加 SFDG 控制的情况下,重新进行灵敏度分析,结果见附录 A 表 A2 中的灵敏度 2。基于灵敏度分析结果确定在 RSC 有功功率控制器的比例增益 K_{pp} 上施加第 2 个 SFDG

控制,进一步构造新的优化问题,求解后得到其参数。施加2个SFDG控制时的仿真结果如图7所示。由图可知,并网风电机组数量(功率)从0逐渐增加到500台(最大容量1000 MW)的过程中,系统均没有发生SSO。

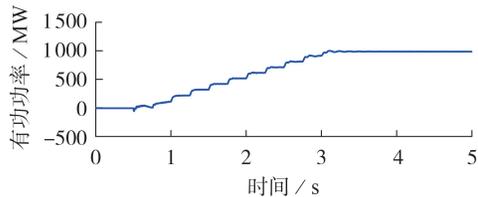


图7 施加2个SFDG控制时的仿真结果

Fig.7 Simulative results with two SFDG controls

进一步地,验证风速变化导致风电机组出力变化情况下施加2个SFDG控制时的SSO抑制效果。当并网风电机组数量分别为200、300、400、500台时,进行SSO风险分析,仿真结果如图8所示。由图可知,在风速变化导致风电机组有功功率动态变化的过程中,系统没有出现功率发散振荡的情况,可见施加的2个SFDG控制在不同的工况下均能够有效保证系统SSO稳定。

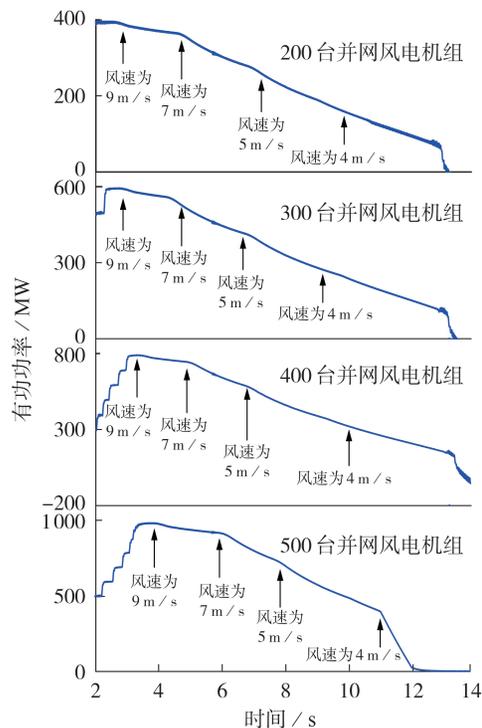


图8 风速变化情况下施加2个SFDG控制时的仿真结果

Fig.8 Simulative results with two SFDG controls when wind speed changes

4.4 SFDG控制对风电机组控制效果的影响验证

施加SFDG控制前、后风电机组转子 q 轴电流参考值(标幺值)对阶跃扰动的响应特性如图9所示。由图可知,施加的SFDG控制不影响阶跃响应特性,

即不影响正常控制功能。

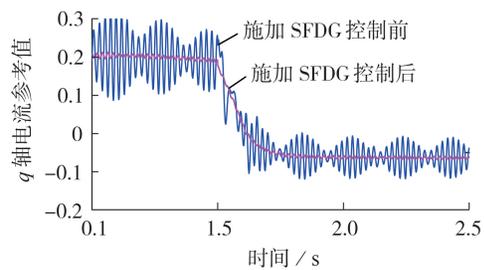


图9 施加SFDG控制前、后风电机组对阶跃扰动的响应特性

Fig.9 Response characteristics of wind turbine generator to step disturbance before and after applying SFDG control

5 结论

本文针对风电-柔直输电系统可能存在的SSO问题,提出了一种基于SFDG控制的抑制策略,通过改变控制器在所关注频段的增益,调节系统的次同步频段阻抗特性,以增强阻尼能力。给出了SFDG控制施加位置的选择方法、控制参数的优化设计方法和多个SFDG控制的“顺序”施加策略。在典型风电-柔直输电系统中,基于风电机组RSC无功功率控制器比例增益和有功功率控制器比例增益环节施加单一或2个SFDG控制,通过电磁暂态仿真分析了单一SFDG控制的适用范围和2个SFDG控制在不同风电并网情况下抑制SSO的有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 尹聪琦,谢小荣,刘辉,等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术,2018,42(4):1117-1123.
YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123.
- [2] 薛安成,付潇宇,乔登科,等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(9): 118-128.
XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 118-128.
- [3] 魏伟,许树楷,李岩,等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J]. 南方电网技术,2015,9(1):73-77.
WEI Wei, XU Shukai, LI Yan, et al. The system commissioning of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 73-77.
- [4] 赵岩,郑斌毅,贺之渊. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J]. 南方电网技术,2012,6(6):6-10.
ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6):

- 6-10.
- [5] 徐衍会,滕先浩. 风电场内机群间次同步振荡相互作用[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):156-164.
XU Yanhui, TENG Xianhao. Interaction of sub-synchronous oscillation between wind turbine clusters in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9):156-164.
- [6] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15):4720-4732.
- [7] 宋斯珩,赵书强. 基于转矩法的双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡分析[J]. 电网技术,2020,44(2):630-636.
SONG Siheng, ZHAO Shuqiang. Analysis of sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farm integrated to grid through VSC-HVDC system based on torque method[J]. Power System Technology, 2020, 44(2):630-636.
- [8] 李光辉,王伟胜,郭剑波,等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5281-5297,5575.
LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18):5281-5297, 5575.
- [9] 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,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.
- [10] 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):6757-6767,7067.
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, 7067.
- [11] LYU J, CAI X, AMIN M, et al. Sub-synchronous oscillation mechanism and its suppression in MMC-based HVDC connected wind farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4):1021-1029.
- [12] 吕敬,董鹏,施刚,等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19):4852-4860.
- [13] 杨京,王彤,毕经天,等. 含直驱风电机组的电力系统次同步振荡鲁棒阻尼控制[J]. 电力系统自动化,2020,44(3):56-65.
YANG Jing, WANG Tong, BI Jingtian, et al. Robust damping control of subsynchronous oscillation in power system with direct-drive wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):56-65.
- [14] LEON A E, MAURICIO J M. Mitigation of subsynchronous control interactions using multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1):420-429.
- [15] 周彦彤,郝丽丽,王昊昊,等. 大容量风电场柔直并网系统的送/受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):100-106.
ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):100-106.
- [16] 高本锋,王飞跃,于弘洋,等. 应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J]. 电工技术学报,2020,35(6):1346-1356.
GAO Benfeng, WANG Feiyue, YU Hongyang, et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6):1346-1356.
- [17] ZHANG F, YIN C Q, YANG X P, et al. The impedance modelling of MMC for oscillation analysis considering control dynamics and delays[C]//8th Renewable Power Generation Conference. Shanghai, China; IET, 2019:1-6.
- [18] LIU H K, XIE X R, GAO X D, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3):3118-3128.
- [19] 刘华坤,谢小荣,何国庆,等. 新能源发电并网系统的同步参考坐标系阻抗模型及其稳定性判别方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):4002-4007,4278.
LIU Huakun, XIE Xiaorong, HE Guoqing, et al. Synchronous reference frame based impedance model and stability criterion for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14):4002-4007, 4278.
- [20] 张明远,肖仕武,田恬,等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术,2018,42(9):2768-2777.
ZHANG Mingyuan, XIAO Shiwu, TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensitivity[J]. Power System Technology, 2018, 42(9):2768-2777.
- [21] 谢小荣,武云生,林惊涛,等. 采用遗传-模拟退火算法优化设计 SVC 次同步阻尼控制器[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):11-14.
XIE Xiaorong, WU Yunsheng, LIN Jingtiao, et al. Optimal design of SVC subsynchronous damping controller using genetic and simulated annealing algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19):11-14.

作者简介:



李景一

李景一(1990—),男,高级工程师,博士,研究方向为海上风电交/直流送出系统的谐振特性分析(E-mail:li_jy3@hdec.com);

李浩志(1998—),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析与控制(E-mail:lih19@mails.tsinghua.edu.cn);

谢小荣(1975—),男,教授,博士,通信作者,研究方向为可再生能源电力系统、次同步振荡分析与控制、柔性输配电系统(E-mail:xiexr@tsinghua.edu.cn);

杨建军(1964—),男,教授级高级工程师,主要从事水电和新能源工程电气系统设计方面的研究工作(E-mail:yang_jj@hdec.com)。

(编辑 陆丹)

Sub-synchronous oscillation mitigation method of wind power-flexible DC transmission system based on supplementary frequency dependent gain control

LI Jingyi^{1,2}, LI Haozhi², YIN Congqi², XIE Xiaorong², YANG Jianjun¹, WANG Ke¹

(1. Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311112, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the SSO (Sub-Synchronous Oscillation) problem caused by dynamic interaction between wind power and flexible DC transmission system, a SSO mitigation strategy based on SFDG (Supplementary Frequency Dependent Gain) control is proposed. Based on impedance theory, the mechanism of SSO in wind power-flexible DC transmission system is revealed. The optimal positions for applying SFDG controls are selected from multiple converter control loops by using parameter sensitivity analysis. By comparing the frequency characteristics of system's polymerization impedance before and after applying SFDG control, the principle and function of SFDG control are explained theoretically. The SSO mitigation effects of single SFDG control and two SFDG controls are verified by electromagnetic transient simulation.

Key words: wind power-flexible DC transmission system; sub-synchronous oscillation; supplementary frequency dependent gain control; parameter optimization; oscillation mitigation

(上接第145页 continued from page 145)

Sub-synchronous oscillation mitigation strategy based on DFIG's ratio of reactance to resistance

LI Zhijun^{1,2}, LIU Yang³, ZHANG Jiaan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

3. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Most of the existing methods to mitigate the SSO (Sub-Synchronous Oscillation) of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) take the rotor speed deviation signal as the input, which may cause super-synchronous oscillation and require large gain. Based on the impedance model of DFIG-based wind farm-series compensation power transmission system in complex frequency domain, the damping control based on grid side converter is equivalent to virtual impedance, and the action mechanism of DFIG under different ratios of reactance to resistance and different compensation angles is explained. Based on the sub-synchronous damping control method with line current as input, an improved damping control strategy and parameter setting method for designing optimal compensation angle based on DFIG's ratio of reactance to resistance are proposed. Taking the SSO events of real wind farms as the examples, the equivalent model of DFIG-based wind farm-series compensation power transmission system is built on MATLAB/Simulink platform, and the effectiveness of the proposed damping control strategy is verified by time-domain simulation.

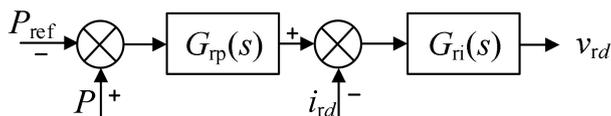
Key words: sub-synchronous oscillation; series compensation; DFIG; ratios of reactance to resistance; sub-synchronous damping control; oscillation mitigation

附录 A

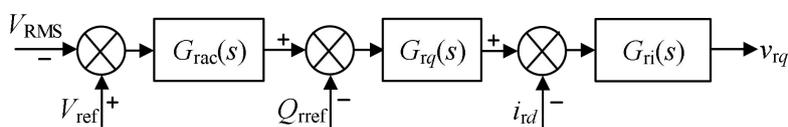
表 A1 双馈风电机组参数

Table A1 Parameters of DFIG-based wind turbine generator

参数	取值	参数	取值
额定电压	0.69 kV	定子漏感	0.1 p.u.
定子电阻	0.0054 p.u.	转子漏感	0.11 p.u.
转子电阻	0.00607 p.u.	互感	4.5 p.u.
转动惯量	6 p.u.	机械阻尼	0.0001 p.u.



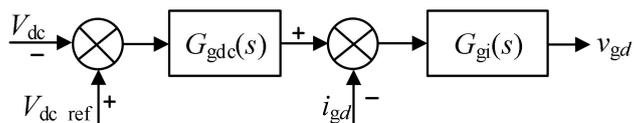
(a) d 轴输出有功功率控制



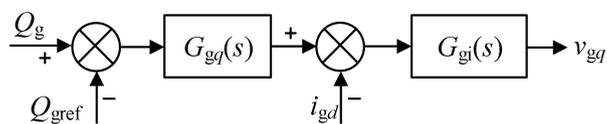
(b) q 轴机端电压控制

图 A1 风电机组 RSC 控制框图

Fig.A1 RSC control block diagram of wind turbine generator



(a) d 轴直流电容电压控制



(b) q 轴网侧无功功率控制

图 A2 风电机组 GSC 控制框图

Fig.A2 GSC control block diagram of wind turbine generator

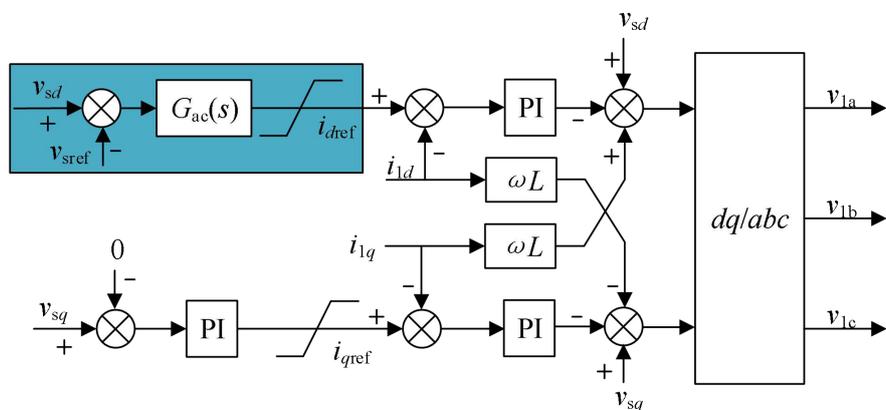


图 A3 柔直送端变流器的控制框图

Fig.A3 Control block diagram of flexible DC transmission end converter

表 A2 风电-柔直输电系统中控制参数的初始值及灵敏度
Table A2 Initial values and sensitivities of control parameters in wind power-flexible DC transmission system

控制位置	传递函数	参数	初始值	灵敏度 1	灵敏度 2
RSC	$G_{rac}(s)$	K_{prac}	0.5	-0.4026	-0.5248
		T_{irac}	0.05 s	-0.1090	-0.7966
	$G_{rq}(s)$	K_{prq}	2	20.9671	13.4026
		T_{ir}	0.05 s	-0.6810	-1.8058
	$G_{ri}(s)$	K_{pri}	2	-1.9407	-1.9474
		T_{iri}	0.01 s	-1.4670	-1.6801
	$G_{rtp}(s)$	K_{prt}	2	2.6427	81.9109
		T_{itp}	0.02 s	-0.0817	1.6028
GSC	$G_{gdc}(s)$	K_{pgdc}	2	-1.3009	-1.1310
		T_{igdc}	0.01 s	0.2846	0.0053
	$G_{gi}(s)$	K_{pgi}	2	-0.1556	-0.7238
		T_{igi}	0.01 s	0.5337	-0.4806
	$G_{gg}(s)$	K_{pgg}	1	0.7044	0.1995
		T_{igg}	0.1 s	0.9010	1.0199
柔直侧	$G_{ac}(s)$	K_{pac}	2	0.1164	1.1601
		T_{iac}	0.01 s	0.1903	1.3783

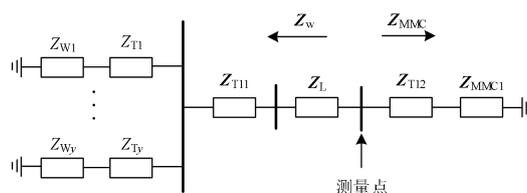


图 A4 风电-柔直输电系统阻抗网络

Fig.A4 Impedance network of wind power-flexible DC transmission system

表 A3 控制器参数对 SSO 的影响系数
Table A3 Influence coefficient of controller parameters on SSO

RSC 控制器比例增益参数				$ \Delta\alpha / \Delta M_{cl} $
K_{Prac}	0.5	0.7	1	0.5
α	5.1	5.06	4.8	
K_{Prq}	0.15	1.5	2	7.18
α	4.64	5.35	12.27	
K_{ri}	2	2.5	3	1.3
α	5.1	4.28	3.8	
K_{Prp}	1.5	2	2.5	0.73
α	5.02	5.1	5.75	
GSC 控制器各比例增益参数				$ \Delta\alpha / \Delta M_{cl} $
K_{gdc}	1.5	2	2.5	0.238
α	5.278	5.1	5.04	
K_{pi}	1.5	2	2.5	0.22
α	5.18	5.1	4.96	
K_{pgg}	0.5	1	1.5	0.42
α	5.08	5.1	5.5	