

渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析

王晓宇, 杨杰, 吴亚楠, 庞辉, 孔明

(全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102200)

摘要:分析渝鄂背靠背柔性直流输电工程投运前后奉节电厂发生次同步振荡的潜在因素;利用复转矩系数法与时域仿真相结合的方法计算分析工程投运前后各个频段系统阻尼特性,并从机理上分析工程投运前后奉节机组发生次同步振荡的风险。在此基础上,利用柔性直流的多维度可控、灵活快速的控制特性,设计混合式阻尼控制策略。对典型工况进行仿真,结果表明所提控制策略相比传统控制策略能够使系统更快恢复到稳态。

关键词:柔性直流输电;次同步振荡;阻尼特性;混合式阻尼控制

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.028

0 引言

与传统直流输电技术相比,柔性直流(下文简称柔直)输电技术具有不存在换相失败风险、可实现有功和无功功率独立控制、运行范围宽、调节范围大等优点,在清洁能源接入与消纳、孤岛和城市供电以及弱电网与异步电网互联等应用领域具有十分明显的竞争力,是未来智能电网和全球能源互联网的重要组成部分^[1-4]。

为解决“强直弱交”带来的大系统运行风险,加快构建坚强西南送端电网,提高华中东4省受电能力,国家电网公司规划建设渝鄂背靠背直流工程,实现西南电网与华中电网的异步互联。

工程投运前,川渝电网与华中电网发电机之间电气联系较弱,在线路重负荷情况下,系统固有的自然阻尼微弱。重庆东北奉节地区将投运2台机组,机组靠近奉节串补站,且串补度较高,存在次同步振荡风险。工程投运后,奉节电厂靠近奉节串补站,又与渝鄂背靠背柔直工程北通道龙泉换流站和龙政常规直流龙泉换流站相连,所以奉节机组附近区域存在高串补度的串联补偿装置,以及常规直流和柔直等高密度、强相关的电力电子设备,存在次同步振荡风险。

截至目前,绝大部分文献围绕串补、风电接入以及常规直流换流器参数设置不当引起的次同步振荡分析方法与应对措施进行了大量研究^[5-14]。文献[5-8]开展了应用机端阻尼控制器实现对串补引起的次同步振荡抑制措施的研究,分析了控制器设计方法,但是该控制器需要在机端装设类似于级联式静止同步补偿器(STATCOM)结构的电力变换器,增

加了投资成本。文献[9-11]研究了双馈、直驱风机等大规模风电接入对次同步振荡影响的机理与特性,但柔直换流器与风机变流器的特性还有所差异。文献[12-14]研究了含常规直流输电系统的交直流混联系统的次同步阻尼特性,指出换流器参数设置不当会引起次同步振荡。文献[15-17]所提出的常规直流附加阻尼控制器对本文中控制器的设计提供了一定参考,但常规直流换流器无法对无功功率进行控制,相比于柔直少了无功控制的自由度。文献[18]设计了柔直附加阻尼控制器,但是没有明确指出柔直对系统振荡特性的影响,文中附加阻尼控制器采用有功类或无功类的控制方式。而对于柔直进行柔性异步互联的大系统,计及柔直对系统次同步振荡的影响和风险评估以及利用柔直灵活、快速的调节能力抑制系统次同步振荡方面的研究较少。因此在工程投运前,结合渝鄂地区奉节机组经串补送出,近区含常规直流和柔直等高密度、强相关电力电子设备的复杂实际情况,研究系统次同步振荡风险及应对方法十分必要。

鉴于此,本文首先分析渝鄂背靠背柔直输电工程投运前后奉节电厂发生次同步振荡的潜在因素;然后利用复转矩系数法与时域仿真相结合的方法计算系统的阻尼特性,分析工程投运前后奉节机组次同步振荡风险;最后利用柔直的多维度可控、灵活快速的控制特性设计系统阻尼控制策略,仿真验证了其有效性。通过本文的研究,进一步明确了柔直在系统次同步振荡中所能发挥的作用,可为渝鄂背靠背柔直工程投运后交直流混联电网的稳定性分析与控制提供参考。

1 系统结构

1.1 渝鄂工程概况

图1为区域电网互联示意图。目前,华中电网与华东电网通过4回 ± 500 kV直流和3回 ± 800 kV特高压直流互联,形成多回直流大容量送电格局。渝

收稿日期:2018-10-17;修回日期:2019-04-28

基金项目:国家重点研发计划“智能电网技术与装备”专项(2016YFB0900900)

Project supported by the Special Project “Smart Grid Technology and Equipment” of the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900900)

鄂断面通过九盘—龙泉、张家坝—恩施 2 个 500 kV 双回输电通道连接,西南与华中电网交流联网。强直弱交带来诸多大系统运行风险,为此,国家电网公司规划建设渝鄂背靠背直流工程,实现西南电网与华中电网的异步互联。渝鄂背靠背柔直联网工程利用现有渝鄂断面 2 个 500 kV 双回输电通道,分别建设南、北通道 2 座容量为 2 500 MW 的柔直背靠背换流站,南北通道输电规模均为 $2 \times 1\,250$ MW,柔直换流单元采用对称单极接线,直流电压为 ± 420 kV,结构示意图如图 2 所示。

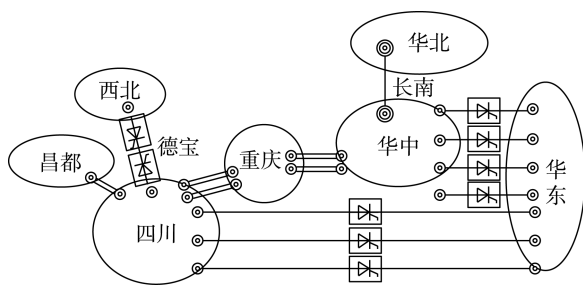


图1 区域电网互联示意图

Fig.1 Schematic diagram of regional grid interconnection

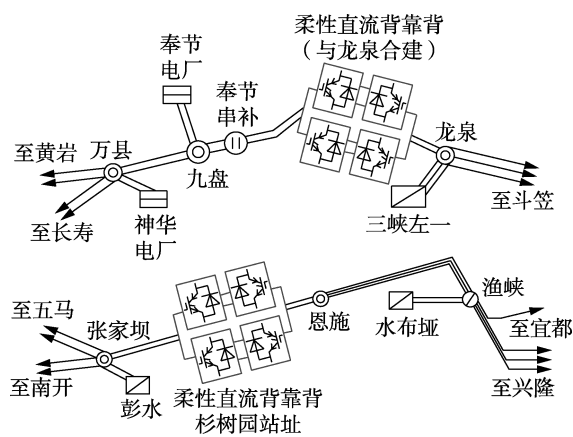


图2 渝鄂工程南北通道示意图

Fig.2 Schematic diagram of south and north corridors for project connecting Chongqing and Hubei Power Grid

工程投运前,渝鄂断面通过九盘—龙泉、张家坝—恩施 2 个 500 kV 双回输电通道连接,西南与华中电网维持交流联网格局。川渝电网与华中电网发电机之间电气联系较弱。在丰水期,二滩以及四川西部水电大发,火电机组开机较少,形成了大量有功

潮流远距离西电东送的局面。这样弱联系的大电网又处于线路重负荷情况下,系统固有的自然阻尼微弱^[19]。此外,重庆东北奉节地区将投运 2 台火电机组,通过 500 kV 输电线路送至九盘变电站,并分别经九盘—龙泉、九盘—万县 2 条 500 kV 双回线路接入华中电网和川渝电网。其中,九盘—龙泉线路长 226 km,在九盘侧带有串联补偿,串补度为 56%;万县—九盘线路长 127 km,无串补。由于奉节火电厂送出通道中带有串补,串补度较高,且龙泉换流站又是龙政常规直流的送端换流站。所以,该区域同时含有串补线路和常规直流输电系统,可能具有一定的次同步谐振风险。

工程投运后,电网格局将发生重大改变,电网的调度、运行面临新的技术问题。柔直系统包含电容、平波电抗器与直流线路等,可能存在与主电路参数有关的中低频谐振频率点^[3]。重庆东北地区奉节电厂发电机通过串补与柔直相连,龙泉换流站又是龙政直流的送端换流站。奉节电厂附近区域将同时含有串补线路、柔直输电系统和常规直流输电系统,具有一定的次同步谐振风险,有必要分析系统次同步振荡特性和相应的控制策略。

1.2 系统结构

图 2 所示的系统接线图中,本文以奉节发电机为研究对象,为满足系统计算条件,最大限度还原系统振荡特性,按照如图 3 所示的系统结构图搭建仿真模型。奉节发电机轴系采用多质量块模型,与其电气距离较近的神华电厂机组、三峡左一水机组的轴系采用单刚体模型,网络中的其他发电机组采用次暂态电抗和固定频率电源进行等值,龙政常规直流和渝鄂柔直采用详细的电磁暂态模型。图中 HP、LPA、LPB、GEN 为奉节电厂汽轮发电机组轴系的 4 个质量块,分别表示高压缸、低压缸 A、低压缸 B、发电机, r_{ac11} 、 X_{ac11} 、 r_{ac12} 、 X_{ac12} 、 r_{ac13} 、 X_{ac13} 、 r_{ac14} 、 X_{ac14} 、 R_{dc} 、 X_{dc} 分别为各线路等效电阻和等效电抗。

渝鄂柔直系统采用对称单极模块化多电平换流器(MMC)拓扑,控制系统结构如图 4 所示,采用电压/功率外环和电流内环的双闭环控制结构。外环控制实现定直流电压控制、有功功率控制、无功功率控制和定交流电压控制等控制目标;内环电流控制器采用基于 dq 解耦的直接电流控制,用于实现换流

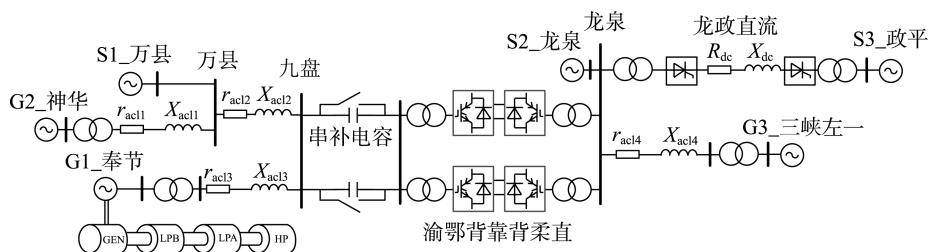


图3 系统结构图

Fig.3 Structure of the system

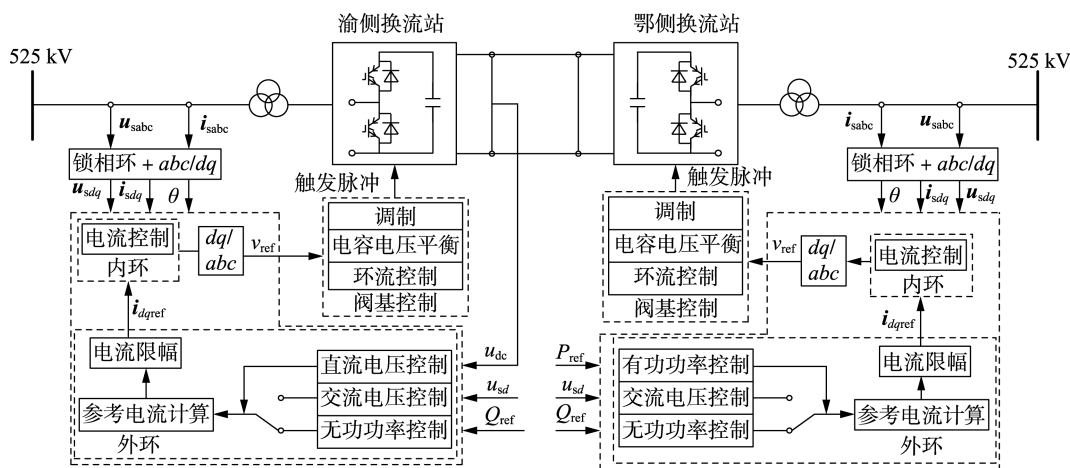


图 4 控制系统结构图

Fig.4 Structure of control system

器交流侧电流波形和相位的直接控制,以快速跟踪参考电流;阀基控制器实现对桥臂子模块电容电压的平衡控制以及产生各子模块触发脉冲功能。图中 u_{sabc} 为变压器网侧交流系统电压, i_{sabc} 为变压器网侧交流系统电流, u_{sdq} 为变压器网侧交流系统电压 Park 变换之后的 d 、 q 轴分量, P_{ref} 为有功功率参考值, Q_{ref} 为无功功率参考值, i_{dqref} 为内环 d 、 q 轴电流参考值, v_{ref} 为调制波, i_{sdq} 为变压器网侧交流系统电流 Park 变换之后的电流, θ 为变压器网侧交流系统电压相角, u_{dc} 为直流电压。

2 渝鄂工程投运前系统次同步振荡风险分析

目前,国内外研究次同步振荡的方法主要有机组作用系数分析法、特征值分析法、复转矩系数法和时域分析法^[20]。本文采用复转矩系数法和时域仿真相结合的分析方法,该方法的优点是不会出现“维数灾”的问题,同时可以考虑到常规直流与柔直控制系统的暂态、动态过程以及柔直系统不同运行工况对次同步振荡的影响,具有较强的工程实用价值^[21-22]。

假设发电机转子作频率为 $\lambda\omega_0$ (λ 为系数, ω_0 为同步转速) 的小幅振荡,发电机电磁转矩的增量可表示为:

$$\Delta T_e = k_s \Delta \delta + k_d \Delta \omega \quad (1)$$

其中, $k_s \Delta \delta$ 为发电机同步转矩, $k_d \Delta \omega$ 为阻尼转矩, k_s 和 k_d 分别为同步转矩系数和阻尼转矩系数, $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 分别为相对于同步旋转坐标系的功率角增量和角速度增量^[23]。为方便分析,可将上述各量取标么值。角速度增量的相量表达式为:

$$\Delta \omega = \frac{1}{\omega_0} (j\lambda\omega_0) \Delta \delta = j\lambda \Delta \delta \quad (2)$$

则有:

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega} = k_d(\lambda) - j \frac{1}{\lambda} k_s(\lambda) \quad (3)$$

为进一步明晰奉节机组的阻尼特性,基于上述复转矩系数法的理论分析,采用复转矩系数法与时域分析相结合的方法。在发电机转子上施加频率为 x ($2 \text{ Hz} \leq x \leq 40 \text{ Hz}$) 的小扰动,并对发电机电磁转矩 T_e 和发电机角频率 ω 进行傅里叶分解,利用式(3)即可求出相应频率下的电气阻尼系数 $D_e(\lambda)$:

$$D_e(\lambda) = \text{Re} \left(\frac{\Delta T_e}{\Delta \omega} \right) \quad (4)$$

采用上述方法对系统阻尼特性的计算分析结果如图 5 所示。

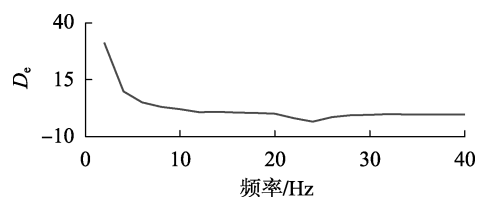


图 5 柔直投运前系统电气阻尼系数

Fig.5 Electrical damping coefficient without flexible HVDC

由图 5 可以看出,从 22 Hz 开始,系统呈现负阻尼特性。根据奉节机组轴系参数计算得出其次同步振荡模态为 11.1、20、21 Hz。可见,系统的负阻尼频率与轴系固有扭振频率十分接近,有一定的次同步振荡风险,仍需进一步研究系统的次同步振荡抑制策略。

3 渝鄂工程投运后系统次同步振荡风险分析

渝鄂工程投运后,龙政直流与奉节电厂机组通过渝鄂背靠背柔直隔开,因此奉节机组发生次同步振荡的诱因中常规直流输电系统的负阻尼影响可以忽略,但串补的因素仍然存在。而柔直作为高密度电力电子设备,其是否会对系统阻尼特性产生不利

影响,仍需进一步研究。

在前一节电磁暂态模型的基础上,加入计及换流阀开断的柔直电磁暂态模型,其采用对称单极主接线结构,额定运行状态为:直流电压为 420 kV,额定功率为 2 500 MW,龙泉侧换流站采用定直流电压和定无功功率控制,九盘侧换流站采用定有功功率和定无功功率控制。同样采用复转矩系数法与时域仿真分析相结合的方法进行阻尼特性分析。同时,分析直流功率变化对系统次同步振荡的影响,结果如图 6 所示。

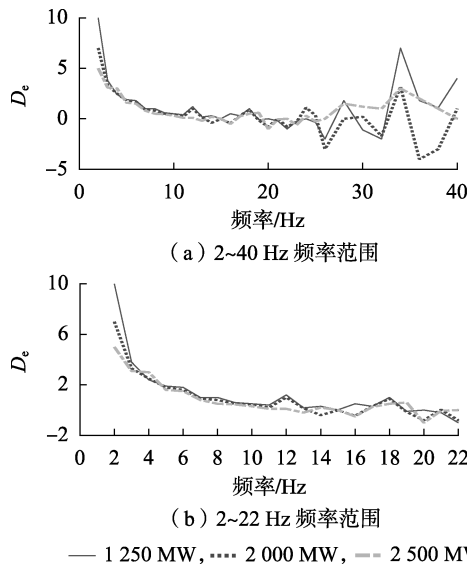


图6 柔直投运后不同传输功率下系统电气阻尼系数

Fig.6 Electrical damping coefficient with flexible HVDC for different transmission powers

从图 6 可看出,在频率低于 22 Hz 的频段,随着直流功率的增大,在相同的频率下,系统的电气阻尼减小。对比图 5 所示柔直投入前的系统阻尼特性,整体而言,系统低频段的阻尼略有减小,在 16~20 Hz 频段内仍有部分频段为负阻尼或临界阻尼,因此有必要研究系统的次同步振荡抑制方法。

4 渝鄂工程投运后系统次同步振荡抑制方法

4.1 附加阻尼控制器的设计

奉节机组存在 11.1、20、21 Hz 的振荡模态。对于 11.1 Hz 的振荡模态,直流系统会提供正阻尼,不需要利用附加阻尼控制器提供正阻尼。因此,附加阻尼控制器的设计只需考虑 20 Hz 和 21 Hz 这 2 个模态。

针对交直流系统的次同步振荡问题,目前国内研究中的主流方法是利用美国电力研究院提出的次同步阻尼控制器 SSDC (SubSynchronous Damping Controller) 来提供附加电磁转矩达到抑制次同步振荡的目的^[15]。针对奉节机组次同步振荡的抑制需求,本文设计图 7 所示的附加次同步振荡阻尼控制

器,由测量环节、滤波环节、相位补偿、增益环节和限幅环节组成^[17,19]。图中, T_1 、 T_2 为滤波环节的时间常数; T_3 — T_6 为相位补偿环节的时间常数; K 为增益环节的放大倍数; $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为控制器输出的上、下限。

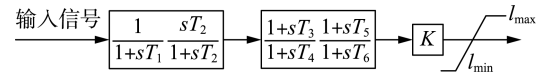


图7 附加阻尼控制策略结构图

Fig.7 Structure of subsynchronous damping control strategy

相位补偿环节作为 SSDC 设计的关键环节,其参数设计的合理性直接影响 SSDC 的性能,本文采用 $(1+sT_3)/(1+sT_4)$ 的超前滞后环节进行相位补偿,其中 T_3 、 T_4 的确定如式(5)所示^[18-19]。

$$\begin{cases} T_3 = (\omega_x \sqrt{a})^{-1} \\ T_4 = aT \\ a = \frac{T_4}{T_3} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \end{cases} \quad (5)$$

其中, ω_x 为所选择相位补偿的频率; ϕ 为 ω_x 对应的需要补偿的相角; T_3 、 T_4 为补偿环节的时间常数。在 20 Hz 和 21 Hz 处用 2 个超前环节,计算得到图 7 中时间常数分别为: $T_3 = T_5 = 0.005$ s, $T_4 = T_6 = 0.002$ s。

4.2 附加阻尼控制实现方法

对于柔直输电系统,附加阻尼控制器的实现可将其输出信号叠加在不同位置上,如极控功率外环、电流内环和阀控参考值。极控功率外环可以叠加到有功参考值 P_{ref} 、无功参考值 Q_{ref} 或同时加到 P_{ref} 和 Q_{ref} 上^[24]。极控电流内环可以叠加到 d 轴电流参考值 $i_{d\text{ref}}$ 、 q 轴电流参考值 $i_{q\text{ref}}$ 或同时加到 $i_{d\text{ref}}$ 和 $i_{q\text{ref}}$ 上。无功类叠加方式对无功功率调节,可减少有功变化对柔直系统直流电压的影响,有利于系统对端换流站的稳定运行。无功不宜在线路中传输,一般采用就地补偿的方式,但对于距离换流站母线较远的发电机组,无功类叠加方式基本起不到抑制效果,而受换流站控制模式影响,有功类叠加方式在功率满额时控制作用有限。仿真研究中也发现单独采用基于有功类或无功类的附加阻尼控制时,抑制振荡需要的时间更长,增大增益幅值又不利于系统的稳定运行,增加了发电机轴系的疲劳累积。此外,极控电流内环叠加方式响应速度更快,且不受外环控制器控制模式变化的影响,通用性更强。

综上所述,为进一步增强柔直系统阻尼效果,缩短发电机轴系振荡的时间,提出采用混合式阻尼控制策略抑制次同步振荡的方法,即同时为极控电流内环 i_{sd} 和 i_{sq} 环节分别配置阻尼控制策略,其中增益和限幅环节如式(6)所示,其控制结构图如图 8 所示。

$$\begin{cases} \Delta i_d = k_1 \Delta i_{d1}, & |\Delta i_d| < 0.1 \text{ p.u.} \\ \Delta i_q = k_2 \Delta i_{q1}, & |\Delta i_q| < \sqrt{\Delta S^2 - \Delta i_d^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中, Δi_d 为附加阻尼控制器输出的内环 d 轴电流参考值; Δi_q 为附加阻尼控制器输出的内环 q 轴电流参考值; k_1 为有功类控制输出量系数; k_2 为无功类控制输出量系数; ΔS 为阻尼控制器输出的电流参考值的限幅值; Δi_{d1} 与 Δi_{q1} 分别为有功类、无功类阻尼控制器中经过相位校正环节后的输出量。考虑到柔直系统一般设计 1.1 倍过负荷运行能力, 因此 Δi_d 最大限幅值暂取 0.1 p.u.。 ΔS 需根据不同工程设计的系统容量、功率运行区间及保护定值协调确定, 根据渝鄂工程实际情况, 暂取 0.316 p.u.。这样保证了单独采用有功或无功类阻尼控制策略时, 在有功或无功功率满额时的控制作用, 实现了换流站在不同控制模式下均能达到较好的次同步振荡抑制效果。

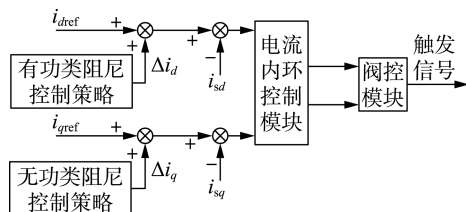


图 8 采用混合式阻尼控制策略的柔直输电控制系统

Fig.8 Flexible HVDC transmission control system with hybrid damping control strategy

5 仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 对图 3 所示的系统进行时域仿真。SSDC 采用完整的控制结构, 并考虑到渝鄂工程的运行区间, $\Delta S = 0.316 \text{ p.u.}$, $k_1 = 20$, $k_2 = 90$ 。通过时域仿真观察有柔直投入 SSDC 系统的阻尼特性曲线, 并与无柔直、有柔直未投 SSDC 的情况进行对比, 仿真结果如图 9 所示。 $t = 8 \text{ s}$ 时, 在机端设置三相接地故障, 故障持续时间 50 ms, 无柔直及有柔直投入 SSDC 前、后 3 种情况下发电机转速的仿真结果如图 10 所示 (图中转速为标幺值)。柔直投入 SSDC 前后发电机各段轴系上的转矩变化情况如图 11 所示 (图中转矩均为标幺值)。柔直采用不同附

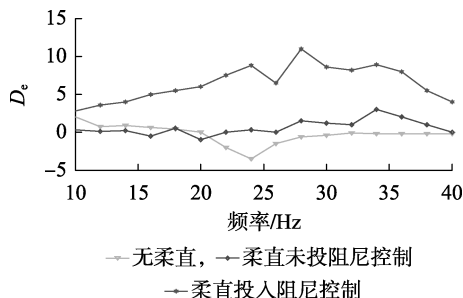


图 9 系统电气阻尼系数对比

Fig.9 Comparison of system electrical damping coefficients

加阻尼控制时的有功、无功变化如图 12 所示。

由图 9 可以看出, 与柔直未投入和柔直投入但未投阻尼控制相比, 柔直投入阻尼控制策略后, 系统整体的电气阻尼系数明显提高, 且均为正阻尼, 尤其是对于原系统的负阻尼段, 阻尼特性有了较为明显的改善。

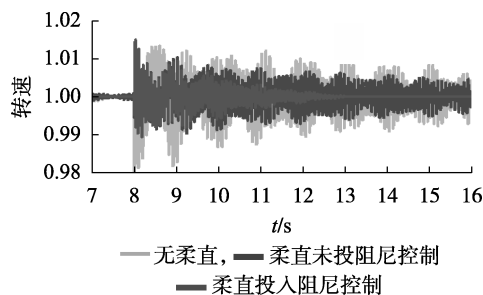
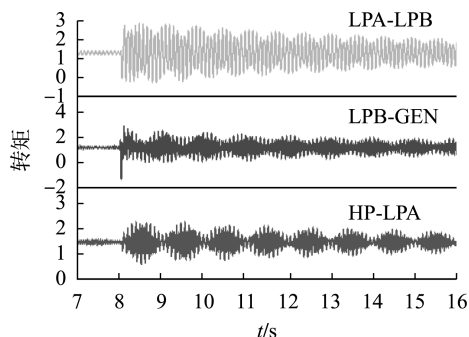
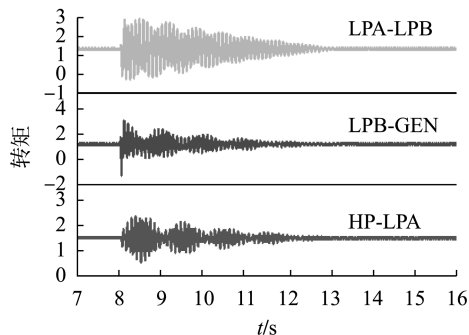


图 10 奉节发电机转速对比

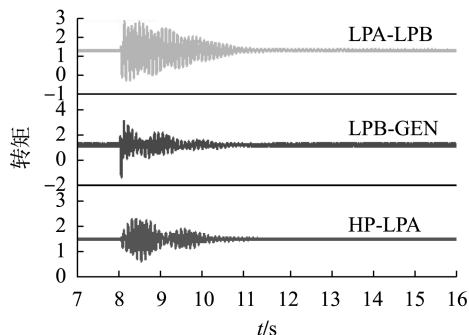
Fig.10 Speed comparison of Fengjie generator



(a) 无阻尼控制



(b) 投入有功类阻尼控制 (叠加至 i_{dref})



(c) 投入混合式阻尼控制 (叠加至 i_{dref} 与 i_{qref})

图 11 柔直投入 SSDC 前、后各段轴系转矩

Fig.11 Shafting torque of each section for flexible HVDC with and without SSDC

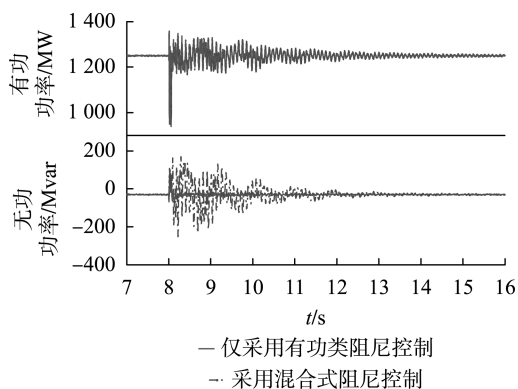


图12 采用不同附加阻尼控制时系统有功功率和无功功率

Fig.12 Active and reactive power with different subsynchronous damping control strategies

由图10可以看出,未投入柔直,当系统有故障扰动时,发电机次同步振荡收敛较慢,故障后8s时仍含有0.05 p.u.的振荡分量。柔直投入运行后,系统次同步振荡收敛稍有改善,故障后8s时仍含有0.04 p.u.的振荡分量。柔直投入SSDC后,系统的次同步振荡迅速收敛,故障后约5s达到稳定状态。

由图11和图12可以看出,柔直未投入阻尼控制策略时,当系统有故障扰动,轴系间扭振收敛较慢。柔直将SSDC输出叠加至 i_{dref} 后,轴系间扭振收敛较快,但在前1.5s,由于有功功率满额,次同步振荡控制作用有限,故障后约5s才达到稳定状态。当柔直投入混合式阻尼控制后,在前1.5s内,有功功率达到满额后,系统增大了无功功率输出,轴系间扭振收敛明显加快,故障后约3s达到稳定状态,大幅降低了系统发生次同步振荡的风险,验证了所提策略的有效性。

6 结论

包含串补、常规直流、柔直、风电机组等大规模、多种输电方式并存的系统中,次同步振荡问题日益突出,严重威胁系统的安全稳定,甚至造成大范围停电事故。通过对渝鄂地区奉节机组投运后次同步振荡特性风险进行分析,利用渝鄂背靠背柔直的灵活、快速、多维度控制性能设计控制策略并进行仿真验证,可以得到如下结论:

(1) 渝鄂背靠背柔直投运前,在轴系固有扭振模态附近系统呈现负阻尼特性,有一定的次同步振荡风险;

(2) 柔直投运后,在频率低于22 Hz的频段,随着柔直传输功率的增大,在相同频率下,系统的电气阻尼减小,在轴系扭振模态附近仍存在负阻尼或临界阻尼的情况;

(3) 通过设计附加阻尼控制,系统电气阻尼系数提高,柔直采用混合式阻尼控制策略,奉节轴系间

扭振收敛速度明显加快,建议在柔直系统容量容许的情况下采用混合式阻尼控制策略;

(4) 本文的研究可为渝鄂背靠背柔直工程投运后交直流混联电网的稳定性分析与控制提供设计依据。

参考文献:

- [1] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):8-17.
- [2] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-173.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):169-173.
- [3] 李云丰,汤广福,贺之渊,等. MMC型直流输电系统阻尼控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(20):5492-5502.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Damping control strategy research for MMC based HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20):5492-5502.
- [4] MAJID M, EDRIS P, SASAN Z, et al. Dynamic model, control and stability analysis of MMC in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1471-1482.
- [5] IEEE Committee Report. A bibliography for the study of sub-synchronous resonance between rotating machines and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1):216-218.
- [6] 谢小荣,郭锡玖,吴景龙. 基于电力电子变流器的机端次同步阻尼控制器研究与测试[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):666-671.
XIE Xiaorong, GUO Xijiu, WU Jinglong. Research and test of a generator terminal subsynchronous damping controller based on power electronic converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):666-671.
- [7] 李晨,孙海顺,朱鑫要,等. 降低次同步谐振风险的大型火电基地经串补线路送出规划和运行方案[J]. 电网技术,2014,38(1):113-119.
LI Chen, SUN Haishun, ZHU Xinyao, et al. Planning and operation schemes for reducing SSR risk of outward power transmission of large-scale thermal generation bases via transmission line with series compensation[J]. Power System Technology, 2014, 38(1):113-119.
- [8] BHIM S, MADHUSUNDAN S, TANDON A K, et al. Transient performance of series-compensated three-phase self-excited induction generator feeding dynamic loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4):1271-1280.
- [9] 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 counter measure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20.
- [10] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [11] 高本锋, 张学伟, 李忍. 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(7): 1-10.
- GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LI Ren. Studies of sub-synchronous oscillation in system with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(7): 1-10.
- [12] 张鹏, 毕天姝. HVDC 引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 961-968.
- ZHANG Peng, BI Tianshu. Mechanism analysis of large disturbance risk of subsynchronous oscillation caused by HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 961-968.
- [13] 郑葵, 肖湘宁, 郭春林, 等. 伊冯/呼辽交直流系统的次同步振荡阻尼特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 41-46.
- ZHENG Rui, XIAO Xiangning, GUO Chunlin, et al. Analysis on damping characteristic of subsynchronous oscillation in AC/DC power grid consisting of 500 kV AC power transmission from Yimin to Fengtun and ± 500 kV DC power transmission from Hulunbuir to Liaoning[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 41-46.
- [14] YIN C C, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Subsynchronous torsional behaviour of a hydraulic turbine-generator unit connected to a HVDC system[C]//Power Engineering Conference. Sydney, Australia: IEEE, 2008: 1-6.
- [15] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
- GAO Benfeng, ZHAO Chengyong, XIAO Xiangning, et al. Design and implementation of SSDC for HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 501-506.
- [16] 赵睿, 李兴源, 刘天琪, 等. 抑制次同步和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 89-92.
- ZHAO Rui, LI Xingyuan, LIU Tianqi, et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 89-92.
- [17] 张帆, 徐政. 直流输电次同步阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 13-17.
- ZHANG Fan, XU Zheng. A method to design a subsynchronous damping controller for HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 13-17.
- [18] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-117.
- SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-117.
- [19] 周小兵, 林常青, 魏威. 华中与川渝联网低频振荡仿真计算研究[J]. 华中电力, 2004, 17(1): 4-7.
- ZHOU Xiaobing, LIN Changqing, WEI Wei. The research on low frequency oscillations calculations of inter linked grid of Central China Power Grid and ChuanYu Power Grid[J]. Central China Electric Power, 2004, 17(1): 4-7.
- [20] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步谐振的理论与方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009: 68-100.
- [21] BLADH J, SUNDQVIST P, LUNDIN U. Torsional stability of hydro-power units under influence of subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3826-3833.
- [22] 李宽, 李兴源, 陈实, 等. 光伏并网抑制由直流输电引起的次同步振荡的可行性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 41-45.
- LI Kuan, LI Xingyuan, CHEN Shi, et al. Analysis on feasibility of damping HVDC-induced subsynchronous oscillation by photovoltaic grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 41-45.
- [23] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其实时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.
- [24] 徐友平, 张珂, 潘晓杰, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 164-165.
- XU Youping, ZHANG Ke, PAN Xiaojie, et al. Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 164-165.

作者简介:



王晓宇

王晓宇(1984—),女,内蒙古鄂尔多斯人,高级工程师,博士,主要研究方向为柔性直流输电控制与保护技术(E-mail: wangxybs@163.com);

杨杰(1983—),男,天津人,高级工程师,博士,主要研究方向为直流输电技术;

吴亚楠(1983—),女,河南三门峡人,高级工程师,博士,主要研究方向为柔性直流输电控制与保护技术;

庞辉(1980—),男,河南商丘人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为直流输电技术;

孔明(1986—),男,湖北荆门人,高级工程师,博士,主要研究方向为直流输电技术。

(下转第202页 continued on page 202)

Verification for security measures of smart substation based on communication state matrix

GAO Xu¹, MA Yingxin¹, WANG Ke², TANG Xiangying², JIANG Zhihan¹, GAO Xiang³, HU Yan²

(1. State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100053, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Shanghai Yihao Automation Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: Due to the application of network communication for smart substation, the security measures of secondary equipment become implicit and complicated, which makes it difficult to verify correctness of the security measures. A strategy for the verification of security measures for smart substations is proposed. Firstly, based on SCD (Substation Configuration Description) file, ICD (IED Capability Description) file and SPCD (Substation Fiber Physical Circuit Description) file, the static topology model of the secondary equipment for smart substations is constructed, and then the corresponding state of the secondary equipment is read. Then the verification method for security measures of smart substations based on communication state matrix is proposed, which reads the step set of security measure operation, checks each step of the security measure operation and checks whether the operation will cause mis-locking or mis-action of the protection. On the basis of the security measure operation verification, the isolation verification is performed to verify whether the effective isolation between the inspection equipment and the operating equipment is implemented. Through the case study of a substation accident and a 220 kV smart substation, the effectiveness of the proposed verification method for security measures is verified.

Key words: smart substations; static topology model; security measures of secondary equipment; communication state matrix; operation verification; isolation verification

(上接第 194 页 continued from page 194)

Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics

WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, PANG Hui, KONG Ming

(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: The potential factors causing subsynchronous oscillation in Fengjie plants are analyzed before and after the operation of back-to back flexible HVDC transmission project connecting Chongqing and Hubei Power Grid. The damping characteristics of system in each frequency band are analyzed by complex torque coefficient approach combined with time-domain simulation, and the risk of sub-synchronous oscillation of Fengjie plants before and after the project operation is analyzed in terms of mechanism. On this basis, a hybrid damping control strategy is designed using multi-dimensional controllable characteristic, flexible and fast control characteristic of flexible HVDC. The typical working conditions are simulated, and results show that the proposed control strategy can make the system recover to steady state more quickly than the traditional control strategy.

Key words: flexible HVDC; sub-synchronous oscillation; damping characteristics; hybrid damping control