

柔性直流系统送受端频率耦合控制方法与稳定性分析

周月宾¹, 陈煜坤¹, 李坡², 王国腾², 黄莹²

(1. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 为避免柔性直流分区对频率稳定性造成的负面影响, 提出了一种柔性直流系统送受端频率耦合控制方法, 并分析采用该方法后系统的稳定性。首先, 针对柔直逆变站提出直流电压与交流频率的耦合附加控制, 将受端交流频率变化映射至直流电压信号; 其次, 针对柔直整流站提出有功功率附加控制, 以送端频率和直流电压变化为输入调整有功功率指令值; 然后, 在采用上述控制方法的情况下建立交直流系统状态空间模型, 分析送受端频率耦合控制对系统稳定性的影响; 最后, 在一个修改的 IEEE 11 节点系统中进行测试, 验证了所提出送受端频率耦合控制方法的有效性与稳定性分析结果的正确性。

关键词: 交流电网分区; 柔性直流系统; 频率耦合控制; 稳定性分析

Frequency Coupling Control Method and Stability Analysis of Sending and Receiving Ends Power Grids Based on MMC-HVDC Systems

ZHOU Yuebin¹, CHEN Yukun¹, LI Po², WANG Guoteng², HUANG Ying²

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To mitigate the negative impact of modular multilevel converter (MMC) based high voltage direct current (HVDC) systems partitioning on frequency stability, a method for frequency coupling control of the sending and receiving ends is proposed, and the system stability after adopting this method is analyzed. Firstly, for the receiving-end MMC station, a coupling additional control of DC voltage and AC frequency is proposed, mapping changes in AC frequency to the DC voltage signal. Secondly, for the sending-end MMC station, active power additional control is proposed, adjusting the reference value based on changes in sending-end frequency and DC voltage. Then, under the application of the aforementioned control method, a state-space model of the AC/DC system is established to analyze the impact of frequency coupling control on system stability. Finally, tests are conducted in a modified IEEE 11-bus system to validate the effectiveness of the proposed frequency coupling control method and the correctness of stability analysis results.

Key words: AC power grid partitioning; MMC-HVDC; frequency coupling control; stability analysis

0 引言

在我国东部发达地区, 负荷密度高, 交流网架结构密集。在此电网格局下, 短路电流超标、潮流控制困难等问题凸显^[1], 交流电网的规模效应趋于

饱和, 交流网架投资边际效益显著下降。利用柔性直流系统对交流电网进行分区可以有效解决高负荷密度地区短路电流超标、潮流控制困难等问题^[2-3], 但会造成同步交流系统规模减小、频率稳定性恶化。柔性直流系统控制方式灵活多变, 可以模拟出不同特性。因此, 如果能够充分利用柔性直流系统的灵活控制和功率调节能力, 交流电网分区后依然保持频率耦合成为可能, 从而为适应高密度负荷发展趋势的网架结构形态提供可行方案。

基金项目: 直流输电技术全国重点实验室项目(SKLHVDC-2023-KF-07)。

Foundation item: Supported by the State Key Laboratory of HVDC (SKLHVDC-2023-KF-07)。

学者们针对柔性直流系统如何参与交流电网调频开展了大量研究, 提出了许多行之有效的调频策略, 主流方式主要包括虚拟同步控制^[4-7]和有功功率-频率下垂控制^[8-11]两类。近年来, 为适应不同场景和需求, 多种新型柔性直流调频控制策略被提出。例如, 文献[12]针对柔性直流系统提出了一种考虑频率稳定的自适应虚拟惯性调频控制策略; 文献[13]利用构网型柔性直流逆变站对受端电网功率扰动的主动响应能力, 实时估计系统状态, 从而优化柔性直流系统调频控制效果; 针对构网型柔性直流系统, 文献[14]进一步提出了控制阻尼环节的改进方法, 在调频功能的基础上兼顾阻尼需求; 进一步地, 文献[15-17]将两端柔性直流系统调频功能扩展至多端柔性直流系统, 从而实现新能源场站通过多个柔直换流站向交流系统提供调频服务。通过上述研究可知, 现有柔性直流系统调频方法通常是向送端或受端电网单一方向提供频率支撑, 未能实现类似交流线路的频率耦合作用。其原因在于柔性直流系统送逆变站各有一个有功控制自由度, 并且其中一个必须用来控制直流电压。对于交流系统而言, 柔性直流系统可用有功自由度只有一个, 增加了柔性直流系统双向参与调频的难度。

此外, 上述研究基本遵循从惯量和阻尼控制入手实现调频的技术路线, 而通过紧急功率支援实现调频被证明是一种可以兼顾送受端调频的可行方式。针对含常规直流和柔性直流的交直流混联电力系统, 文献[18]提出一种考虑直流优先级的紧急功率支援协调策略, 以减小功率支援带来的无功功率变化影响; 文献[19]则提出一种动态区域控制偏差与柔性直流紧急功率支援协调控制策略, 从而充分发挥柔性直流功率裕度。然而, 双向紧急功率支援的实现需要借助通信手段, 并且动作阈值和支援功率大小需要离线通过多次仿真校核确定, 这在运行方式多变的新能源电力系统中会造成仿真计算负担过大。

近年来, 背靠背柔性直流系统分区互联系统的频率支撑受到广泛关注^[20-21]。背靠背柔性直流系统送受端在同一个站内, 两端频率或相位信号可以同时获取, 无需通信即可根据两端系统状态调整柔直功率。然而, 背靠背柔直系统的应用场景有限, 为了能够充分利用输电通道资源、提高断面输送容量, 长线路柔性直流系统在高负荷密度电网中具有

广泛应用前景^[22-27]。目前, 针对长线路柔性直流系统如何在不借助通信手段的前提下实现送受端频率耦合还有待解决。

针对上述问题, 本文首先针对柔性直流逆变站研究直流电压和交流频率耦合方法, 从而将直流电压作为受端交流频率信号的传递载体; 然后研究柔性直流整流站功率附加控制方法, 根据送端频率和直流电压调整功率指令值; 最后通过状态空间模型分析频率耦合控制对系统稳定性的影响。

1 柔直系统送受端频率耦合控制

令柔直系统逆变站定直流电压, 整流站定有功功率。为了能够让逆变站直流电压与受端交流系统频率耦合, 一种最简单的方式是采用线性映射关系, 如式(1)所示。

$$\Delta U_{\text{dciref}} = K_{\text{uf}} \Delta f_{\text{re}} \quad (1)$$

式中: ΔU_{dciref} 为逆变站直流电压参考值变化量; K_{uf} 为比例系数; Δf_{re} 为受端系统频率变化量。

但是柔直换流站的直流电压运行范围有限, 需要在比例系数 K_{uf} 取值时充分考虑频率偏差和直流电压的安全范围。假设受端电网最低可接受频率偏差为 Δf_{max} , 当受端电网频率偏差超出该数值后稳控防线将会动作, 而柔直换流站可承受最大直流电压偏差设为 ΔU_{max} , 则比例系数 K_{uf} 的取值可以设置为:

$$K_{\text{uf}} = \frac{\Delta U_{\text{max}}}{\Delta f_{\text{max}}} \quad (2)$$

在式(1)控制逻辑下, 逆变站直流电压与交流频率耦合在一起, 并呈现正比例关系。借助直流电压的变化整流站可以在无通信的情况下感知到受端交流频率变化。送端直流电压与受端直流电压关系为:

$$U_{\text{dcr}} = U_{\text{dci}} + I_{\text{dc}} R_{\text{dc}} \quad (3)$$

式中: U_{dcr} 为整流站直流电压; U_{dci} 为逆变站直流电压; I_{dc} 为直流电流; R_{dc} 为直流电阻。在高压交流线路中, 电抗远大于电阻, 所以通常忽略线路电阻。但是在高压直流线路中, 电阻是电压降落的关键因素, 因此在计算送受端直流电压时, 电阻需加以考虑。

直流电流又可以表示为:

$$I_{\text{dc}} = \frac{P_{\text{dcr}}}{U_{\text{dcr}}} \quad (4)$$

式中 P_{dcr} 为整流站有功功率。

一般来说, 频率响应时间尺度在秒级, 而柔直换流站响应功率或直流电压指令值的时间在十毫秒级^[28]。因此, 在关注交流系统频率特性时可以近似忽略柔直换流站的动态特性, 认为柔直换流站电气量可以实时跟随指令值。

$$U_{\text{dci}} = U_{\text{dciref}} \quad (5)$$

$$P_{\text{dcr}} = P_{\text{dcref}} \quad (6)$$

式中 U_{dciref} 、 P_{dcref} 分别为柔直逆变站的电压指令值、整流站的功率指令值。

将式(4)代入式(3)可以得到逆变站直流电压与整流站直流电压和功率的关系为:

$$U_{\text{dci}} = U_{\text{dcr}} - \frac{P_{\text{dcr}}}{U_{\text{dcr}}} R_{\text{dc}} \quad (7)$$

结合式(1), 可以得到受端交流频率与整流站直流电压之间的定量关系为:

$$\Delta f_{\text{re}} = \frac{\Delta U_{\text{dci}}}{K_{\text{uf}}} = \frac{U_{\text{dcr}} - \frac{P_{\text{dcr}}}{U_{\text{dcr}}} R_{\text{dc}} - U_{\text{dci0}}}{K_{\text{uf}}} \quad (8)$$

式中 ΔU_{dci} 、 U_{dci0} 分别为逆变站直流电压变化量、初始值。

根据式(8), 在已知整流站直流电压变化和功率的情况下, 可以根据整流站运行状态变化估计出受端交流频率的变化量。为了能够将送端频率和受端频率耦合起来, 不失一般性, 整流站功率指令值可以设置为如下形式。

$$\Delta P_{\text{dcref}} = K_{\text{If}} \int (\Delta f_{\text{se}} - \Delta f_{\text{re}} - K_{\text{LB}} \Delta P_{\text{dcref}}) dt + K_{\text{Pr}} (\Delta f_{\text{se}} - \Delta f_{\text{re}} - K_{\text{LB}} \Delta P_{\text{dcref}}) \quad (9)$$

式中: K_{Pr} 和 K_{If} 分别为控制比例和积分系数; K_{LB} 为反馈系数; Δf_{se} 为送端系统频率偏差; ΔP_{dcref} 为功率参考值变化量。

将式(8)代入式(9), 在柔直系统输送功率未达到上限的前提下, 利用式(9)可以通过柔直系统功率输送实现送受端交流系统频率耦合。如果在式(9)中将反馈系数 K_{LB} 设置为 0, 则柔直系统的控制目标是令送受端同频, 从而展现出与交流线路相似的作用。

需要注意的是, 在控制过程中引起直流电压变化的因素有很多, 例如交流系统电压波动或者交流系统故障, 这些因素会导致频率耦合控制误动。可以通过设置各个环节的控制带宽和响应时间来改善频率耦合控制误动的问题^[29]。

各个控制环的带宽及响应时间如下。

内环电流控制以最高带宽(100~500 Hz)和最快响应时间(2~10 ms)实现电流指令的快速跟踪与谐波抑制; 外环直流电压控制以中等带宽(10~50 Hz)和响应时间(20~100 ms)维持直流电压稳定, 抑制功率波动; 频率耦合附加控制则以最低带宽(0.1~2 Hz)和最长响应时间(0.5~10 s)专门响应交流系统的低频频率偏差, 提供功率调节。这种带宽逐级递减、时间尺度逐层扩展的设计, 既保障了内环对高频扰动的快速抑制, 又避免了外环与调频控制的动态冲突。

由于频率耦合附近控制的带宽最小和响应时间最长, 同时可设置死区, 在直流电压由于其他因素发生波动时, 受端换流站定直流电压控制迅速将其控制到指令值, 频率耦合附加控制尽管动作也会被调整到稳态。

根据式(9)可知, 整流站功率指令值 ΔP_{dcref} 是根据受端系统频率变化量 Δf_{re} 来调整的, 因此只要针对 Δf_{re} 设置死区即可防止频率耦合控制误动作。死区可设置如下。

$$|\Delta f_{\text{re}}| \leq \Delta f_{\text{w}} \quad (10)$$

式中 Δf_{w} 为频率死区。只有在频率偏差超过 $\pm \Delta f_{\text{w}}$ 时, 频率耦合控制才开始动作。

一般来说, 频率耦合控制是一种动态控制策略, 主要应用于应对短时功率扰动, 其设计目标在于迅速调整系统状态以维持频率的稳定性。该控制方法通常不会引起柔性直流系统功率变化超过 1 p.u. 的幅度。在动态响应过程中, 系统的潮流方向通常保持相对稳定, 潮流方向的显著变化通常发生在较长时间尺度内, 并且与系统运行工况的长期变化密切相关。

2 频率耦合控制下系统稳定性分析

为了能够分析频率耦合控制投入对系统稳定性的影响, 首先建立如图 1 所示简单系统的数学模型。在图 1 中, P_{in} 为柔直系统输入功率, P_{con} 为线路传输功率, P_{out} 为柔直系统输出功率, C_{se} 和 C_{re} 分别为送端和受端 MMC 的等值电容, R_{dc} 为直流线路电阻。

对于送受端交流系统, 采用一阶频率波动方程来描述频率动态特性:

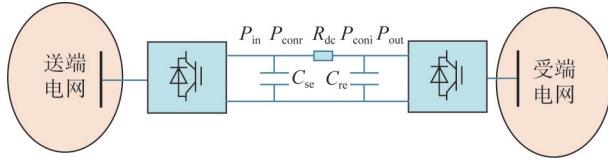


图 1 两端柔直系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of the two-terminal MMC-HVDC system

$$2H_{re} \frac{d\Delta f_{re}}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - D_{re} \Delta f_{re} + P_{out} \quad (11)$$

$$2H_{se} \frac{d\Delta f_{se}}{dt} = P_{mr} - P_{er} - D_{se} \Delta f_{se} - P_{in} \quad (12)$$

式中: H_{se} 和 H_{re} 分别为送受端电网惯量; P_{mr} 和 P_{mi} 分别为送受端电网机械功率; P_{er} 和 P_{ei} 分别为送受端电网电磁功率; D_{se} 和 D_{re} 分别为送受端电网阻尼系数; P_{in} 和 P_{out} 分别为送端电网经直流送出的电磁功率、受端电网经直流接收的电磁功率。

送受端 MMC 换流站的等值电容微分方程可以写作:

$$C_{se} U_{dcr} \frac{dU_{dcr}}{dt} = P_{in} - P_{conr} \quad (13)$$

$$C_{re} U_{dci} \frac{dU_{dci}}{dt} = P_{coni} - P_{out} \quad (14)$$

式中: C_{se} 和 C_{re} 分别为送受端 MMC 等值电容; P_{conr} 和 P_{coni} 分别为直流线路送端和受端功率。

对于送端换流站, 忽略内环控制, 近似认为内环输出可以无延时跟随控制目标, 并忽略外环比例环节, 可以近似认为交流侧有功电流变化如式(14)所示。

$$\frac{1}{K_{dpr}} \frac{di_{sdr}}{dt} = P_{dcref} - P_{in} \quad (15)$$

式中: i_{sdr} 为送端 MMC 有功电流; K_{dpr} 为积分系数。

在送受端频率耦合控制下, 忽略式(9)中比例系数, 功率参考值的变化可以写为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{lf}} \frac{d\Delta P_{dcref}}{dt} &= \Delta f_{se} - \\ &\frac{1}{K_{uf}} \left(U_{dcr} - \frac{P_{in}}{U_{dcr}} R_{dc} - U_{dci0} \right) - K_{LB} \Delta P_{dcref} \end{aligned} \quad (16)$$

电流和功率间的关系为:

$$P_{in} = i_{sdr} U_{sr} \quad (17)$$

式中 U_{sr} 为送端 MMC 换流母线电压。

类似地, 对受端 MMC, 可以写出微分代数方程为:

$$\begin{cases} \frac{1}{K_{dpi}} \frac{di_{sdi}}{dt} = -U_{dcref} + U_{dcre} \\ \Delta U_{dcref} = K_{uf} \Delta f_{re} \\ P_{out} = i_{sdi} U_{si} \end{cases} \quad (18)$$

式中: i_{sdi} 为受端 MMC 有功电流; K_{dpi} 为积分系数; U_{si} 为受端 MMC 换流母线电压。

柔直系统线路方程为:

$$\begin{cases} I_{dc} = \frac{1}{R_{dc}} (U_{dcr} - U_{dci}) \\ P_{conr} = U_{dcr} I_{dc} \\ P_{coni} = U_{dci} I_{dc} \end{cases} \quad (19)$$

式中 I_{dc} 为直流电流。

结合式(11) — (19) 可以推导出送受端频率耦合控制投入后系统线性化模型为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{sys} \mathbf{x} \quad (20)$$

其中:

$$\mathbf{x} = [\Delta f_{re}, \Delta f_{se}, \Delta U_{dci}, \Delta U_{dcr}, \Delta i_{sdi}, \Delta i_{sdr}, \Delta P_{dcref}]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{A}_{sys}(:, 1:3) =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{D_{re}}{2H_{re}}, & 0, & 0, \\ 0, & -\frac{D_{se}}{2H_{se}}, & 0, \\ 0, & 0, & -\frac{1}{R_{dc}C_{re}} + \frac{i_{sdi}U_{si}}{C_{re}U_{dci}^2}, \\ 0, & 0, & \frac{1}{R_{dc}C_{se}}, \\ -K_{uf}K_{dpi}, & 0, & K_{dpi}, \\ 0, & 0, & 0, \\ 0, & K_{lf}, & 0, \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{A}_{sys}(:, 4:7) =$$

$$\begin{bmatrix} 0, & \frac{U_{si}}{2H_{re}}, & 0, & 0, \\ 0, & 0, & -\frac{U_{sr}}{2H_{se}}, & 0, \\ \frac{1}{R_{dc}C_{re}}, & -\frac{U_{si}}{C_{re}U_{dci}}, & 0, & 0, \\ -\frac{1}{R_{dc}C_{se}} - \frac{i_{sdr}U_{sr}}{C_{se}U_{dcr}^2}, & 0, & \frac{U_{sr}}{C_{se}U_{dcr}}, & 0, \\ 0, & 0, & 0, & 0, \\ 0, & 0, & -K_{dpr}U_{sr}, & K_{dpr} \\ -\frac{K_{lf}}{K_{uf}} \left(1 + \frac{P_{in}R_{dc}}{U_{dcr}^2} \right), & 0, & \frac{K_{lf}}{K_{uf}} \frac{R_{dc}}{U_{dcr}} U_{sr}, & -K_{lf}K_{LB} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: ΔU_{dcr} 为整流站直流电压变化量; Δi_{sdi} 、 Δi_{sdr}

分别为送、受端 MMC 有功电流变化量。选择典型参数如表 1 所示。

表 1 两端柔直互联系统关键参数

Tab. 1 Key parameters of the MMC-HVDC interconnected system

参数	有名值	标么值/p. u.
送端系统容量 S_{sc}/MVA	500	5
受端系统容量 S_{re}/MVA	1000	10
送端系统惯量 H_{sc}/s	4	\
受端系统惯量 H_{re}/s	3	\
送端系统阻尼系数 D_{sc}		1
受端系统阻尼系数 D_{re}		1
送端 MMC 换流母线电压 U_{sf}/kV	110	1
受端 MMC 换流母线电压 U_{sr}/kV	110	1
送端 MMC 换流母线有功电流 i_{sdf}/kA	0.7793	1.05
受端 MMC 换流母线有功电流 i_{sdr}/kA	0.7422	1
送端整流站直流电压 U_{dc}/kV	105	1.05
受端逆变站直流电压 U_{dci}/kV	100	1
送端整流站等效电容 C_{sc}/mF	0.31	0.5
受端整流站等效电容 C_{re}/mF	0.31	0.5
柔直系统输入功率 P_{in}/MW	105	1.05
直流电阻 R_{dc}/Ω	5	0.05
送端 MMC 外环积分系数 K_{dqr}	0.2	
受端 MMC 外环积分系数 K_{dqi}	0.2	
直流电压-频率下垂系数 K_{uf}	10.0	
功率附加频率控制积分系数 K_{if}	20.0	
功率附加频率控制比例系数 K_{pf}	2.0	
功率反馈系数 K_{LB}	1.0	

在表 1 中, 送受端电网等效惯量 H_{sys} 和阻尼系数 D_{sys} 可由开机方式获得, 根据送受端系统中所有发电机惯量和阻尼系数根据发电机容量加权之后计算得到, 如式 (24) — (25) 所示。

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i H_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (24)$$

$$D_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i D_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (25)$$

式中: S_i 、 H_i 、 D_i 分别为第 i 台发电机的容量、惯量、阻尼系数; n 为系统中发电机数量。

送受端 MMC 电压、电流等运行参数可由稳态工作点获得, 送受端 MMC 控制参数可由柔直控制

系统获得。

为了分析频率耦合控制投入对系统稳定性的影响, 下面通过改变控制参数大小, 绘制出矩阵 A_{sys} 特征根在复平面的变化情况。首先改变受端柔直换流站直流电压与交流频率之间的下垂系数 K_{uf} , 得到 K_{uf} 增大过程中矩阵 A_{sys} 特征根的变化情况如图 2 所示。从图 2 中可以看到, 随着 K_{uf} 的增大, 系统特征根逐渐远离虚轴, 意味着系统稳定性有所改善。根据 K_{uf} 的物理意义可知, K_{uf} 越大, 柔直系统直流电压随受端系统交流频率变化的幅度越大, 直流电压越能体现出频率变化信息, 从而有利于频率耦合控制过程中系统的稳定性。

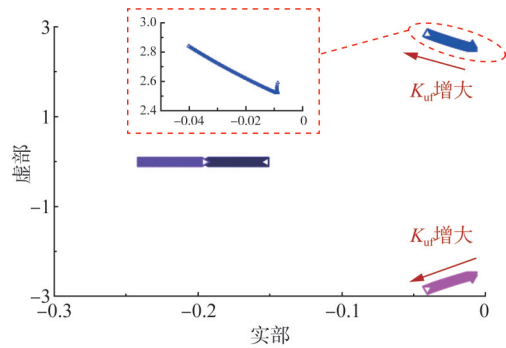


图 2 特征根随比例系数 K_{uf} 的变化

Fig. 2 Eigenvalues versus the proportional coefficient K_{uf}

根据式 (1) 和 (9) 可知, 受端柔直换流站采取直流电压-频率下垂控制, 而送端柔直换流站则根据直流电压估计受端交流频率, 采取送受端频率偏差积分控制。不失一般性, 在送受端频率偏差中增加了直流功率的反馈信号, 如果改变反馈系数 K_{LB} , 得到频率耦合控制下系统特征根变化情况如图 3 所示。从图 3 可以看到, 随着反馈系数 K_{LB} 的增大, 系统特征根朝着远离虚轴的方向移动。特征根的虚部没有发生变化, 仅仅是实部在减小, 说明增大反馈系数 K_{LB} 能够增加频率耦合控制稳定性。但需要说明的是, 随着反馈系数 K_{LB} 增大, 送受端频率耦合程度会下降。当反馈系数 K_{LB} 为 0 时, 频率耦合控制的目标是让送受端系统同频, 当 K_{LB} 大于 0 时, 送受端频率会保持一定偏差。

上述内容分析了频率耦合控制中的两个关键控制参数对系统稳定性的影响。除了控制参数外, 送受端系统惯量大小也是影响稳定性的关键因素。一般来说, 如果送受端系统间的惯量相差过大, 则对柔直系统来说, 要想试图维持送受端系统同频是困

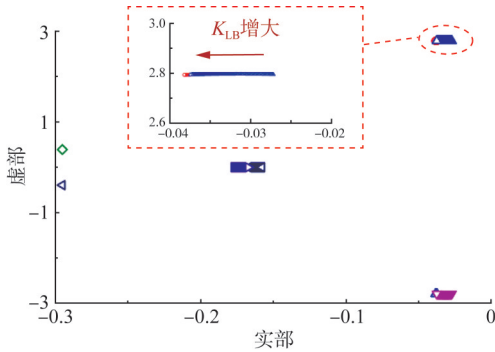


图 3 特征根随反馈系数 K_{LB} 的变化

Fig. 3 Eigenvalues versus the feedback coefficient K_{LB}

难的。如果送受端系统惯量大小相仿, 则频率耦合控制较为容易获得更好的控制效果。首先增大受端系统的惯量大小, 得到系统特征根的变化如图 4 所示。从图 4 可以看到, 随着受端系统的惯量增大, 系统特征根朝着靠近虚轴的方向移动, 说明系统稳定性变差。

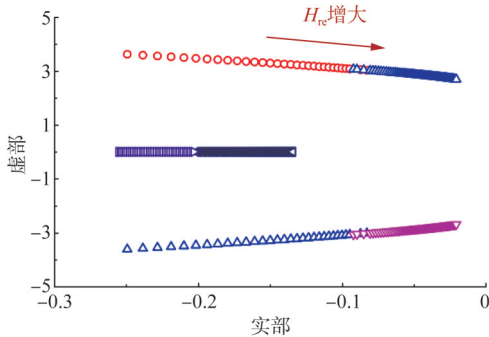


图 4 特征根随受端系统惯量 H_{re} 的变化

Fig. 4 Eigenvalues versus the inertia H_{re} of the receiving-end system

进一步地, 改变送端系统惯量大小, 得到系统特征根的变化如图 5 所示。从图 5 可以看到, 送端系统惯量的增大会导致实轴上的特征根朝着虚部移动。但是距离虚轴最近的共轭特征根几乎不随送端系统惯量的增加而移动。上述现象说明送端系统惯量的增加同样对频率耦合控制的稳定性有负面影响, 但是和受端惯量变化的作用机理有所不同。

根据上述分析可知, 送受端系统惯量越大, 频率耦合控制投入后对系统稳定性的负面影响越大, 可以通过增大直流电压-频率下垂系数, 或增大功率反馈系数来提高频率耦合控制的稳定性。

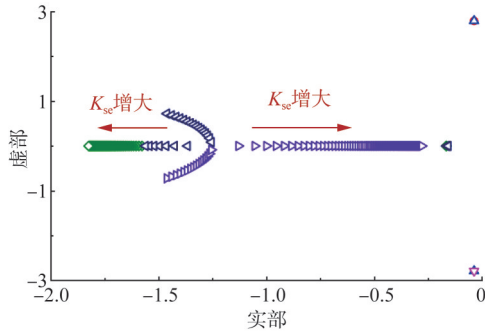


图 5 特征根随送端系统惯量 H_{re} 的变化

Fig. 5 Eigenvalues versus the inertia H_{re} of the sending-end system

3 算例分析

所提出的频率耦合控制方法在一个修改的 IEEE 11 节点系统中进行仿真验证。修改的 IEEE 11 节点系统拓扑结构如图 6 所示, 区 1 和区 2 之间的交流联络线被替代为两端柔直系统。柔直系统的关键参数如表 2 所示, 正常工况下输送功率为 500 MW, 额定容量是 1 000 MVA。区 1 为送端系统, 区 2 为受端系统, 负荷和发电机参数与原 IEEE 11 节点系统保持一致。算例中系统基准容量的选择独立于实际设备容量, 目的是统一各元件参数标么值以简化计算, 通常来说, 取 100 MVA。

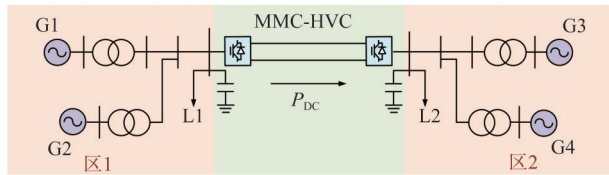


图 6 修改的 IEEE 11 节点系统

Fig. 6 Modified IEEE 11-bus system

表 2 柔直系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of the MMC-HVDC system

参数	数值
额定容量/MVA	1 000
稳态输送功率/MW	500
柔直换流站额定直流电压/kV	400
线路电阻/ Ω	0.4
子模块电容/ μF	6 667
单一桥臂子模块数量	200

3.1 频率耦合控制效果验证

为了验证频率耦合控制的效果, 设置频率耦合控制参数如表 3 所示。

表 3 频率耦合控制主要参数

Tab. 3 Main parameters of the frequency coupling control

参数	数值
直流电压-频率下垂系数 K_{df}	1.0
功率附加频率控制积分系数 K_{If}	20
功率附加频率控制积分系数 K_{Pf}	2
功率反馈系数 K_{LB}	0.1

假设送端系统负荷 L1 发生 3 p.u. 的有功功率阶跃扰动, 扰动发生后送受端系统频率变化、机械功率变化分别如图 7—8 所示。从图 7 中可以看到, 在送端系统发生功率扰动后, 送端系统频率首先下降, 通过柔直系统的频率耦合控制, 减小输送功率, 受端系统也随之感知到功率缺额, 频率发生下降, 与送端系统共同承担功率扰动。在图 7 中, 还展示了受端估计频率, 该频率是利用式(8)根据直流电压变化估计所得受端系统频率变化。可以看到, 式(8)估计结果基本能跟随受端频率变化, 误差较小。从图 8 中可以看到, 送受端机械功率共同响应系统频率的变化, 送端频率下降较多, 送端机械功率变化较大。

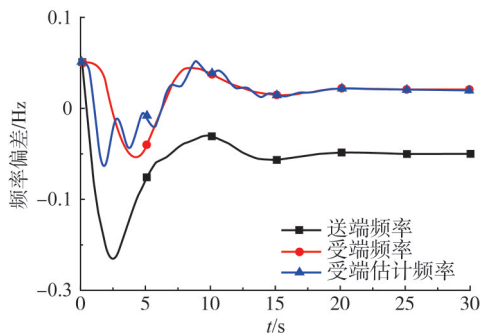


图 7 送端系统扰动下频率变化

Fig. 7 Frequency variations under the disturbance at the sending-end

在送端系统功率扰动下, 柔直系统直流电压和功率的变化分别如图 9—10 所示。从图 9—10 中可以看到, 由于送端系统频率下降, 频率耦合控制会降低柔直系统输送功率, 帮助送端系统承担功率缺额。由于柔直系统输送功率下降, 受端系统出现功率缺额, 从而进一步导致受端系统频率下降。当柔直系统感知到受端系统频率下降时, 受端换流站会主动降低自身直流电压参考值, 从而将直流电压作为受端系统交流频率变化的信息载体, 送端换流站通过直流电压的变化估计受端系统交流频率变化

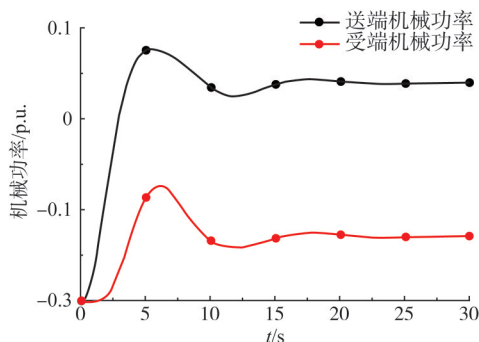


图 8 送端系统扰动下机械功率变化

Fig. 8 Mechanical power variations under the disturbance at the sending-end

量, 根据送受端系统频率差值调整自身输送功率。图 9 中送受端直流电压存在 2 % 的偏差, 这是因为直流线路电阻较大, 符合实际情况。

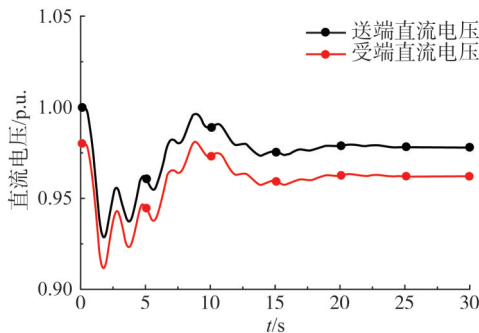


图 9 送端系统扰动下直流电压变化

Fig. 9 DC voltage variations under the disturbance at the sending-end

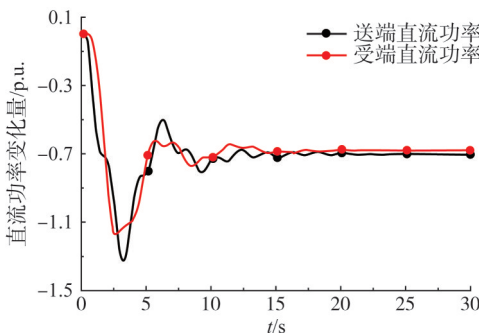


图 10 送端系统扰动下直流功率变化

Fig. 10 DC power variations under the disturbance at the sending-end

从上述结果可以看到, 频率耦合控制在送端系统发生功率扰动后能够有效地通过改变柔直系统运行状态实现送受端系统频率耦合。由于功率反馈系数 K_{LB} 的存在, 频率耦合控制的目标并非保证送受

端频率完全一致, 会存在一定偏差。

为了进一步验证频率耦合控制效果, 下面在受端系统发生功率扰动下进行仿真计算。令受端系统负荷 L2 出现有功功率 3 p.u. 阶跃, 得到送受端系统频率变化、机械功率变化分别如图 11—12 所示。从图 11 中可以看到, 受端系统发生功率扰动后, 受端系统频率首先下降, 通过柔直系统的频率耦合控制, 增大输送功率, 送端系统也随之感知到功率缺额, 频率发生下降, 与受端系统共同承担功率扰动。类似地, 通过式(8)得到的受端系统估计频率也展示在图 11 中, 可以看到估计值与实际值之间的误差较小, 从而能够保证频率耦合控制的精度。从图 12 中可以看到, 送受端机械功率共同响应系统频率的变化, 受端频率下降较多, 受端机械功率变化较大。

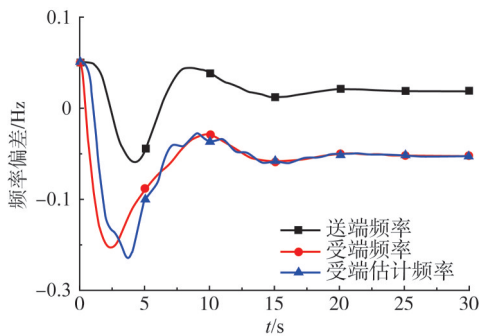


图 11 受端系统扰动下频率变化

Fig. 11 Frequency variations under the disturbance at the receiving-end

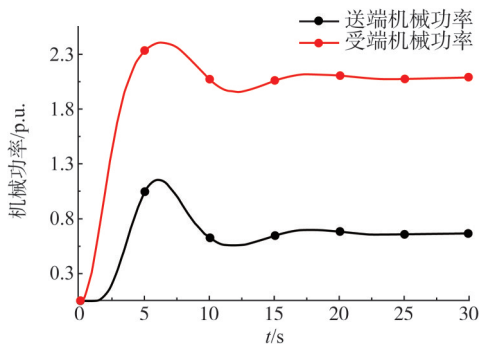


图 12 受端系统扰动下机械功率变化

Fig. 12 Mechanical power variations under the disturbance at the receiving-end

受端系统功率扰动下, 柔直系统的直流电压和功率变化分别如图 13—14 所示。从图 13—14 中可以看到, 受端系统交流频率下降后, 直流电压下降, 柔直送端换流站通过直流电压的变化感知到受

端电网频率变化, 从而主动增大柔直系统输送功率参考值, 以期能够为受端系统提供功率支撑。

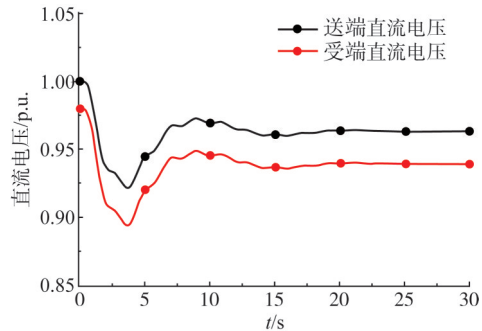


图 13 受端系统扰动下直流电压变化

Fig. 13 DC voltage variations under the disturbance at the receiving-end

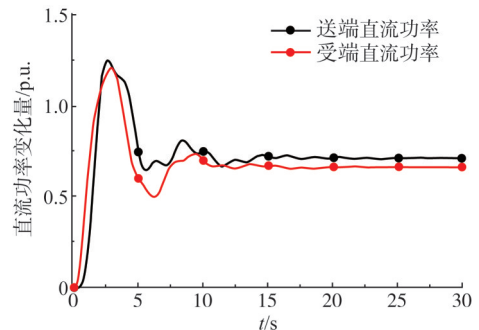


图 14 受端系统扰动下直流功率变化

Fig. 14 DC power variations under the disturbance at the receiving-end

上述仿真结果表明, 不论是送端还是受端系统出现功率扰动, 柔直系统的频率耦合控制均能有效改变柔直系统输送功率, 从而实现送受端系统之间的功率互济, 提高送受端系统的频率稳定性。需要说明的是, 本文提出的频率耦合控制方法本质上是利用直流电压幅值的变化实现送受端频率的耦合, 使得直流线路呈现出类似于交流线路的作用。在发生扰动时, 未发生扰动的一端向另一端提供支撑, 两端共同承担扰动, 能够同时利用两端系统的调频能力和备用容量来应对扰动, 提高系统整体的频率稳定性。

前面提到, 频率耦合控制参数的设置对系统稳定性影响较大。下面通过仿真验证频率耦合控制的关键参数对系统稳定性的影响。首先改变直流电压-频率下垂系数 K_{uf} 的大小, 得到不同 K_{uf} 大小下小扰动仿真计算结果如图 15 所示。从图 15 中可以看到, 当 K_{uf} 数值减小后, 频率耦合控制下的系统稳

定性明显变差,在小扰动下直流功率呈现出明显的振荡,说明的减小不利于系统稳定性,从而验证了前文理论分析结论。

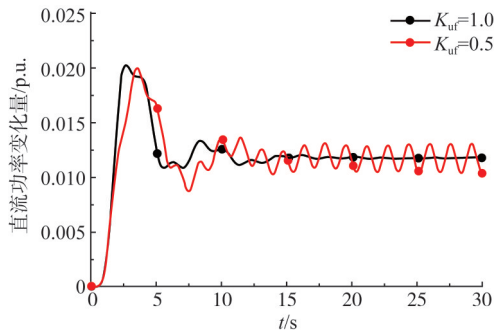


图 15 不同 K_{uf} 大小下小扰动仿真计算结果

Fig. 15 Small-disturbance simulation results under different K_{uf}

然后改变功率反馈系数 K_{LB} 的大小,得到小扰动仿真结果如图 16 所示。从图 16 中可以看到,当 K_{LB} 数值减小后,直流功率在小扰动下出现明显的振荡现象,说明系统频率稳定性恶化。因此,频率耦合控制在实际应用时,应当适当增大直流电压-频率下垂系数 K_{uf} 和功率反馈系数 K_{LB} 的数值,以保证系统稳定性。

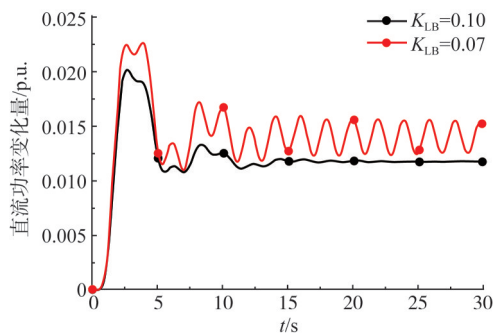


图 16 不同 K_{LB} 大小下小扰动仿真计算结果

Fig. 16 Small-disturbance simulation results under different K_{LB}

4 结语

本文针对两端柔直系统提出了一种送受端频率耦合控制方法,并分析了该控制方法投入对系统稳定性影响。频率耦合控制具体实现思路是建立受端换流站直流电压与交流频率间的映射关系,从而令柔直系统直流电压承载受端系统频率变化信息,进而根据送受端频率间的差值改变送端换流站功率参考值,实现送受端系统之间的功率互济。这种功率互济使得柔直系统实现了类似交流线路的频率耦合

作用,相当于扩大了交流同步电网的规模,能够同时利用送受端系统的调频能力和备用容量应对扰动,提高了系统整体的频率稳定性。

在一个修改的 IEEE 11 节点系统中仿真结果表明,利用本文所提出的频率耦合控制方法可以有效通过送受端系统间的功率互济提升系统整体频率稳定性。此外,在实际应用时,应当适当增加直流电压-受端频率下垂系数 K_{uf} 和送端换流站频率耦合控制中功率反馈系数 K_{LB} ,以保证系统稳定性。

参考文献

- [1] 司金冬,吴熙,郭其胜,等.面向高比例新能源消纳的地区电网柔性互联规划与运行技术综述[J].电网技术,2024,48(6):2272-2286.
SI Jindong, WU Xi, GUO Qisheng, et al. Review of flexible interconnection of regional grids interconnection planning and operation techniques for high Percentage of renewable energy consumption [J]. Power System Technology, 2024, 48 (6) : 2272 - 2286.
- [2] 汪际峰,陈亦平,徐光虎,等.多分区异步互联电网的直流频率限制器协调控制策略研究[J].电网技术,2023,47(10):3971-3979.
WANG Jifeng, CHEN Yiping, XU Guanghu, et al. Coordination strategy of frequency limit control on multi-area HVDCs under asynchronous interconnection [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3971 - 3979.
- [3] 刘柏良,汪惟源,张君黎,等.大规模风电并网后江苏电网柔直换流站与UPFC的有功功率协调控制方法[J].南方电网技术,2024,18(3):138-145.
LIU Bailiang, WANG Weiyuan, ZHANG Junli, et al. Active power coordination control method of converter stations of MMC-DC system and UPFC in Jiangsu power grid interconnected with the large scale wind power [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 138 - 145.
- [4] GUAN Minyuan, PAN Wulue, ZHANG Jing, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3093 - 3101.
- [5] 申志鹏,朱介北,李斌,等.基于柔性直流输电系统的双边惯量和阻尼模拟控制方案[J].高电压技术,2021,47(10):3505-3518.
SHEN Zhipeng, ZHU Jiebei, LI Bin, et al. Bilateral inertia and damping emulation control scheme for VSC-HVDC transmission systems [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47 (10): 3505 - 3518.
- [6] CAO Yijia, WANG Weiyu, LI Yong, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 750 - 761.
- [7] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-359.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):

- 349 – 359.
- [8] WANG Weiyu, LI Yong, CAO Yijia, et al. Adaptive droop control of VSC-MTDC system for frequency support and power sharing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1264 – 1274.
- [9] 付聪, 卞志鹏, 王铃, 等. 改善异步分区电网频率稳定性的VSC-HVDC控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 139 – 144.
- FU Cong, BIAN Zhipeng, WANG Qian, et al. VSC-HVDC control strategy for enhancing frequency stability of segmented power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 139 – 144.
- [10] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等. 支撑城市电网分区互联的柔性直流优化控制技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 179 – 185.
- TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. Optimization control technology of VSC-HVDC supporting partition interconnection of urban power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 179 – 185.
- [11] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2513 – 2519.
- WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Dynamic frequency constraint unit commitment in large-scale wind power grid connection [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2513 – 2519.
- [12] 刘英培, 谢乾, 梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 129 – 136.
- LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible DC transmission system based on adaptive virtual inertia [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 129 – 136.
- [13] 王炜宇, 易念棋, 蔡晔, 等. 基于功率扰动观测的构网型柔直系统辅助频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1680 – 1691.
- WANG Weiyu, YI Nianqi, CAI Ye, et al. A power-disturbance observer-based auxiliary frequency control of grid-forming VSC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1680 – 1691.
- [14] 黄勇, 马秀达, 张进, 等. 构网型柔性直流系统阻尼环节控制策略优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 889 – 897.
- HUANG Yong, MA Xiuda, ZHANG Jin, et al. Optimization of damping control strategy for grid-forming VSC-HVDC [J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 889 – 897.
- [15] 喻文翔, 韩子熙, 许洵, 等. 考虑解耦功率优化分配的多端混合直流互联系统频率响应控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1798 – 1810.
- YU Wenxiang, HAN Zixi, XU Xun, et al. Frequency response control strategy for multi-terminal hybrid DC Interconnected systems considering decoupling of optimal power allocation [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1798 – 1810.
- [16] 王炜宇, 李勇, 曹一家, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统自适应下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 142 – 149, 161.
- WANG Weiyu, LI Yong, CAO Yijia, et al. Adaptive droop control strategy participating in power grid frequency regulation for VSC-MTDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 142 – 149, 161.
- [17] 董志国, 徐全海, 陈琦, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 146 – 155.
- DONG Zhiguo, XU Quanhai, CHEN Qi, et al. Improved droop control strategy involved in power grid frequency regulation for VSC-MTDC transmission systems [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 146 – 155.
- [18] 束洪春, 邵宗学, 赵伟, 等. 含柔性直流的交直流混联电力系统紧急频率控制研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5590 – 5604.
- SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Research on emergency power control of AC-DC hybrid power system with flexible DC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5590 – 5604.
- [19] 陈鹏远, 黎灿兵, 周斌, 等. 异步互联电网柔性直流输电紧急功率支援与动态区域控制偏差协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 3025 – 3034.
- CHEN Pengyuan, LI Canbing, ZHOU Bin, et al. VSC-HVDC emergency power support and dynamic area control error coordinated control strategy for improving the stability of asynchronous interconnected power grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3025 – 3034.
- [20] 毛森茂, 王若愚, 谢岩, 等. 一种基于频率的柔性直流分区互联系统协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1): 137 – 141.
- MAO Senmao, WANG Ruoyu, XIE Yan, et al. Frequency-based coordinated control strategy for VSC-DC segmented system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1): 137 – 141.
- [21] 王一振, 邱逢良, 雷鸣, 等. 含大容量新能源接入的柔性直流背靠背分区互联系统频率支撑策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 959 – 968.
- WANG Yizhen, QIU Fengliang, LEI Ming, et al. Frequency support strategy for VSC-BTB based DC Segmented system with large capacity renewable energy integration [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 959 – 968.
- [22] 马立民, 文俊, 王书杰, 等. 应用柔直技术改善220kV分区电网性能的研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(10): 83 – 90.
- MA Limin, WEN Jun, WANG Shujie, et al. A study on the application of VSC-HVDC to improve the performance of 220 kV partition grid [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10): 83 – 90.
- [23] 肖峻, 郭伟, 李蕴, 等. 分区柔性互联城市电网的静态安全性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3141 – 3146.
- XIAO Jun, GUO Wei, LI Yun, et al. State key laboratory of advanced electromagnetic engineering and technology [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3140 – 3146.
- [24] 肖峻, 蒋迅, 黄仁乐, 等. 城市电网分区柔性互联装置的定容方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 99 – 105.
- XIAO Jun, JIANG Xun, HUANG Renle, et al. Capacity confirmation method of partitioned flexible interconnection device in urban power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 99 – 105.
- [25] 肖峻, 李思岑, 黄仁乐, 等. 城市电网分区柔性互联选址方法及示范应用[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 10 – 20.
- XIAO Jun, LI Sichen, HUANG Renle, et al. Siting method and demonstration application of flexible interconnection in urban power grid partition [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 10 – 20.