

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191114

## 基于 UPFC&DC-SDC 的交直流电网低频振荡抑制研究

刘俊磊<sup>1</sup>, 乔小敏<sup>2</sup>, 杨韵<sup>1</sup>, 钟雅珊<sup>1</sup>, 钱峰<sup>1</sup>, 王峰<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510062;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 针对交直流混联电网的低频振荡问题, 提出一种将统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)及直流附加阻尼控制器(DC Supplementary Damping Controller, DC-SDC)相结合的 UPFC&DC-SDC 综合阻尼控制系统。为使 UPFC&DC-SDC 综合控制系统发挥最佳控制效果, 由 UPFC 及 DC-SDC 的状态变量, 推导了含 UPFC&DC-SDC 综合控制系统的基于 VSC-HVDC 的交直流混联系统特征根增广矩阵。基于该矩阵计算了多运行方式下系统小干扰概率特征值。以该矩阵特征值实部加权后的和最小为目标函数, 考虑该矩阵阻尼比、线路传输极限及安全等约束, 构建了确定 UPFC&DC-SDC 综合控制系统参数的优化方程, 并通过粒子群优化算法求解。以 CEPRI36v7 系统为例, 验证了所提方法能在不制约直流输电能力的同时抑制低频振荡。

**关键词:** 统一潮流控制器; 直流附加阻尼控制器; 低频振荡; 协调控制; 参数优化方程

### Study on damping low frequency oscillation of an AC/DC power grid based on UPFC & DC-SDC

LIU Junlei<sup>1</sup>, QIAO Xiaomin<sup>2</sup>, YANG Yun<sup>1</sup>, ZHONG Yashan<sup>1</sup>, QIAN Feng<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>

(1. Power Dispatch Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510062, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to damp the low-frequency oscillation of an AC/DC hybrid power grid, a UPFC & DC-SDC integrated control system is proposed. This combines the Unified Power Flow Controller (UPFC) with the DC Supplementary Damping Controller (DC-SDC). In order to make the UPFC & DC-SDC control system have the best control effect, the eigenvalue augmentation matrix of AC/DC hybrid system based on VSC-HVDC is obtained from the state variables of UPFC & DC-SDC. Based on the matrix, the eigenvalues of small signal probability are calculated of multi-operating modes. The objective function is to minimize the weighted sum of the real part of the probabilistic eigenvalue. Considering the eigenvalue augmented matrix damping ratio, transmission limit and safety voltage constraints, an optimization equation for determining the parameters of the UPFC & DC-SDC integrated control system is constructed and solved by a particle swarm optimization algorithm. Taking the CEPRI36v7 system as an example, it is verified that the control strategy can damp low-frequency oscillation without restricting DC transmission capacity.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904503) and Scientific and Technological Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20180125).

**Key words:** unified power flow controller; DC supplementary damping controller; low-frequency oscillation; coordinated control; parameter optimization equation

## 0 引言

直流输电系统具有输送距离远、容量大、能耗

小等特点<sup>[1-2]</sup>, 且能够灵活控制潮流输送的大小和方向<sup>[3-4]</sup>。随着直流输电技术的广泛应用, 我国电网运行已几乎接近临界极限点, 振荡失稳问题日渐严重, 其中低频振荡最为频繁<sup>[5]</sup>。低频振荡将对发供电设备造成很大威胁, 甚至可能诱发连锁故障, 造成大面积停电、系统瓦解等灾难性后果<sup>[6]</sup>。因此, 抑制

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904503);  
广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20180125)

系统低频振荡极其重要<sup>[7-8]</sup>。

为此,文献[9]将带有附加阻尼控制器的 UPFC 用于提高系统小干扰稳定性,以抑制系统的低频振荡。文献[10]将 DC-SDC 应用于提高直流系统的阻尼比,并采用极点配置技术设计了一种基于电压源变流器的高压直流(Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)输电系统的附加阻尼控制器,以抑制系统的低频振荡。对于采用 DC-SDC 抑制系统低频振荡的方法,文献[11-12]采用有闭环区域极点的优化方法设计了一种基于 VSC-HVDC 多重小信号模型的反馈阻尼控制器。文献[13]将静止同步补偿器与 DC-SDC 相结合以控制高压直流输电系统交流侧的母线电压,从而提高系统抵御换相失败的能力,降低其小干扰失稳的风险,但该方法限制了直流外送的有功功率。

UPFC 作为功能全面、性能优越的柔性交流输电系统设备,可控制线路潮流、稳定电压、平衡负载从而提高输电能力<sup>[14-15]</sup>,本文拟将 UPFC 与 DC-SDC 相结合,形成 UPFC&DC-SDC 控制系统,对该控制系统参数的确定进行协调优化,以提升对交直流混联系统低频振荡的抑制能力,并利用 PSASP 软件进行仿真验证。

## 1 直流系统小信号模型

### 1.1 直流输电系统小信号模型

本文以 VSC-HVDC 为研究对象,其与交流系统相联的等效电路如图 1 所示<sup>[16-17]</sup>。

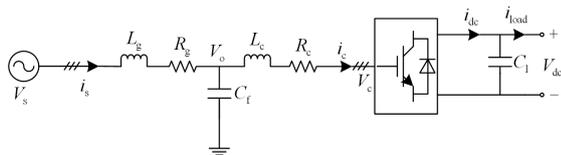


图 1 与交流系统相联的 VSC-HVDC 等效电路图

Fig. 1 VSC-HVDC equivalent circuit diagram associated with AC system

图中,  $L_g$ 、 $R_g$  为交流线路的电感和电阻;  $L_c$ 、 $R_c$  为 VSC 滤波桥侧电感和电阻;  $C_f$ 、 $C_1$  分别为对地电容和直流线路电容;  $V_s$ 、 $V_0$ 、 $V_c$ 、 $V_{dc}$  分别为交流变电站母线电压、直流变电站母线电压、VSC 直流侧首端电压和直流线路电压;  $i_s$ 、 $i_c$ 、 $i_{dc}$ 、 $i_{load}$  分别为交流变电站输出电流、VSC 入端电流、直流线路电流和负载电流。

图 1 所示的等效电路,其微分方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{cd}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}i_{cd} - \omega i_{cq} + \frac{1}{L_c}(V_{od} - V_{cd}) \\ \frac{di_{cq}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}i_{cq} + \omega i_{cd} + \frac{1}{L_c}(V_{oq} - V_{cq}) \\ \frac{dV_{od}}{dt} = \frac{1}{C_f}(i_{sd} - i_{cd}) + \omega V_{oq} \\ \frac{dV_{oq}}{dt} = \frac{1}{C_f}(i_{sq} - i_{cq}) - \omega V_{od} \\ \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g}i_{sd} - \omega i_{sq} + \frac{1}{L_g}(V_{sd} - V_{od}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_g}{L_g}i_{sq} + \omega i_{sd} + \frac{1}{L_g}(V_{sq} - V_{oq}) \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3V_{cd}i_{cd} + V_{cq}i_{cq}}{2C_1V_{dc}} - \frac{i_{load}}{C_1} \end{cases} \quad (1)$$

VSC-HVDC 直流电流控制器<sup>[18-19]</sup>的控制框图如图 2 所示。

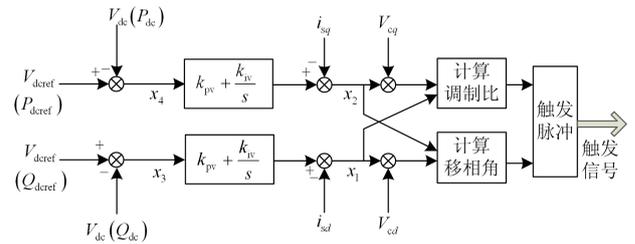


图 2 VSC-HVDC 直流电流控制框图

Fig. 2 VSC-HVDC DC current control block diagram

图中,  $P_{dref}$ 、 $Q_{dref}$  为直流系统传输有功与无功的目标值;  $V_{dref}$  为直流电压目标值;  $x_1$ 、 $x_2$  为电流内环  $d$ 、 $q$  轴 PI 调节状态量;  $x_3$ 、 $x_4$  为电压外环  $d$ 、 $q$  轴 PI 调节状态量;  $k_{pv}$ 、 $k_{iv}$  为 PI 调节器的比例系数和积分系数;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为交流变电站输出电流  $i_s$  的  $d$  轴分量与  $q$  轴分量;  $V_{cd}$ 、 $V_{cq}$  分别为 VSC 首端电压  $V_c$  的  $d$  轴分量与  $q$  轴分量。

对调节状态量  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ , 其微分方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_{iv}x_3 + k_{pv}\Delta V_{dc} - i_{sd} - \omega L_c i_{sq} \\ \frac{dx_2}{dt} = k_{iv}x_4 + k_{pv}\Delta V_{dc} - i_{sq} - \omega L_c i_{sd} \\ \frac{dx_3}{dt} = \Delta V_{dc} \\ \frac{dx_4}{dt} = \Delta V_{od} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Delta$  为各量的变化量。联立式(1)和式(2), 并在稳态工作点附近进行线性化, 可得 VSC-HVDC 小信号模型。

$$\frac{d\Delta x_{\text{VSC-V}}}{dt} = A_{\text{VSC-V}}\Delta x_{\text{VSC-V}} + B_{\text{VSC-V}}\Delta u_{\text{VSC-V}} \quad (3)$$

式中:  $x_{\text{VSC-V}}$  为 VSC-HVDC 的状态变量;  $u_{\text{VSC-V}}$  为其控制变量。且有

$$\begin{cases} \Delta x_{\text{VSC-V}} = [\Delta i_{cd}, \Delta i_{cq}, \Delta V_{dc}, \Delta V_{od}, \Delta i_{sd}, \Delta i_{sq}, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4]^T \\ \Delta u_{\text{VSC-V}} = [\Delta V_{sd}, \Delta V_{sq}, \Delta i_{dc}, \Delta V_{dc}, \Delta V_{sd}] \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 系统小干扰稳定性分析

电力系统小干扰线性化状态方程<sup>[20]</sup>为

$$\Delta \dot{x} = A(x, u, v)\Delta x \quad (5)$$

式中:  $A(x, u, v)$  为系统状态矩阵;  $x$  为系统状态变量;  $u$  为诸如发电机有功出力  $R_g$  的控制变量;  $v$  为节点电压、相角以及线路潮流等相关变量。

将式(3)代入式(5), 可得含 VSC-HVDC 的交流系统特征根增广矩阵。

$$A(x, u, v, x_{\text{VSC}}, u_{\text{VSC}})\phi = \lambda\phi \quad (6)$$

式中: 共轭特征值  $\lambda = \sigma \pm j\omega$ ;  $\phi$  为特征值  $\lambda$  的特征向量。

对于衡量小干扰稳定性的重要指标阻尼比  $\xi$ , 可用特征值表示, 即

$$\xi = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (7)$$

通过特征值计算能够为控制器的控制策略设计提供参考依据。

## 2 UPFC&DC-SDC 协调控制

### 2.1 UPFC&DC-SDC 控制系统

本文提出将 UPFC 和 DC-SDC 相结合, 形成如图 3 所示的 UPFC&DC-SDC 的综合控制系统, 共同对交直流混联系统的低频振荡进行协调控制。

图中,  $V_s \angle \theta_s$  为母线的电压幅值和相角;  $V_r \angle \theta_r$

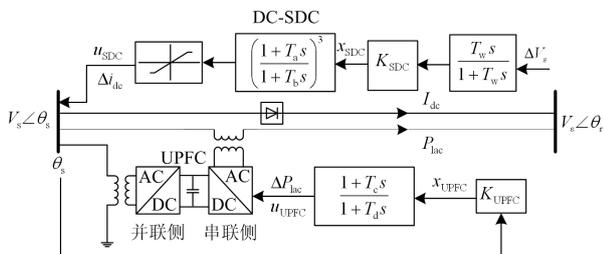


图 3 UPFC & DC-SDC 协调控制系统图

Fig. 3 Diagram of UPFC & DC-SDC coordination control system

为末端母线的电压幅值和相角;  $T_w$  为 DC-SDC 隔直时间常数;  $K_{\text{SDC}}$  为 DC-SDC 放大系数;  $T_a$ 、 $T_b$  为 DC-SDC 超前滞后环节时间常数;  $K_{\text{UPFC}}$  为 UPFC 的放大系数;  $T_c$ 、 $T_d$  为 UPFC 的超前滞后环节时间常数;  $x_{\text{UPFC}}$ 、 $u_{\text{UPFC}}$  分别为 UPFC 的状态变量和控制变量;  $x_{\text{SDC}}$ 、 $u_{\text{SDC}}$  分别为 DC-SDC 的状态变量和控制变量<sup>[21]</sup>。

UPFC 用于控制母线电压  $V_s$  以及线路潮流  $P_{\text{lac}}$ ; DC-SDC 用于对直流输电线路的电流  $I_{\text{dc}}$  进行控制。

### 2.2 多运行方式下协调控制

式(6)中的状态矩阵  $A$  任一特征值可表示成如式(8)所示的节点电压非线性函数。

$$\lambda_k = g_k(U) \quad (8)$$

将式(8)在节点电压均值处进行泰勒级数展开, 并只考虑线性部分的影响, 得

$$\lambda_k = g_k(\bar{U}) + \sum_{i=1}^{2N} \frac{\partial g_k}{\partial U_i} \Delta \bar{U}_i \quad (9)$$

式(9)等式右边为特征值对节点电压的灵敏度矩阵,  $\Delta \bar{U}_i$  表示第  $i$  个节点电压的偏差量,  $N$  表示节点个数。对式(9)求期望得

$$E(\lambda_k) = g(\bar{U}) \quad (10)$$

采用线性化模型时, 式(10)中特征根微增量为

$$\Delta \lambda = J_\lambda \Delta U \quad (11)$$

不同运行方式下节点电压可能不同, 为简化计算, 取系统正常运行出现概率最大的运行方式的节点电压作为参考标准, 以最大差量进行修正, 则由式(9)可得式(12)所示的系统的特征根方程修正方程, 对其进行模态分析, 进而分析系统概率小干扰稳定性。

$$\lambda_k = \lambda_{k0} + \Delta \lambda_k = \sigma_k + j\omega_k \quad (12)$$

### 2.3 UPFC&DC-SDC 控制参数协调优化

DC-SDC 主要以改善系统特定模式振荡阻尼为目标, 单独作用时, 其  $K_{\text{SDC}}$  的值多采用留数法和极点配置法进行设定<sup>[22-24]</sup>。为使 UPFC&DC-SDC 控制系统发挥最佳控制效果, 其控制参数需彼此协调。

将 UPFC 及 DC-SDC 的状态变量  $x_{\text{UPFC}}$ 、 $x_{\text{SDC}}$  代入式(6), 可得含 UPFC&DC-SDC 的基于 VSC-HVDC 的交直流混联系统特征根增广矩阵。

$$A(x, u, v, x_{\text{VSC}}, u_{\text{VSC}}, x_{\text{UPFC}}, u_{\text{UPFC}}, x_{\text{SDC}}, u_{\text{SDC}})\phi = \lambda\phi \quad (13)$$

由式(13)可得系统特征值  $\lambda$  及对应的阻尼比  $\xi$ 。当特征值实部  $\sigma$  大于 0 时, 对应的阻尼比  $\xi$  小于 0, 系统易出现低频振荡; 当  $\sigma$  小于 0 时, 阻尼比为

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\sigma)^2}} \quad (14)$$

特征值实部  $\sigma$  越小, 对应的阻尼比  $\xi$  越大, 抑制低频振荡的能力越强。因此本文以加权后系统特征值实部之和最小为目标函数, 即

$$\min \sum_{i=1}^n W_i \sigma_i \quad (15)$$

$$\text{s.t. } C_1 \leq \xi_i \leq C_2 \quad (16)$$

$$\sigma_i \leq C_3, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (17)$$

$$P_{\text{lac min}} \leq P_{\text{lacref}} \leq P_{\text{lac max}} \quad (18)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个振荡模式加权系数;  $\sigma_i$  为第  $i$  个特征值实部;  $\xi_i$  为第  $i$  个特征值对应的阻尼比;  $n$  为系统出现低频振荡模式的总数;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为优化系统阻尼比及特征值约束参数;  $P_{\text{lacref}}$ 、 $V_{\text{sref}}$  为 UPFC 控制交流线路末端有功功率潮流目标值与并联侧母线电压目标值。

为详尽分析 UPFC 及 DC-SDC 对系统特征值的影响程度, 将式(15)、式(16)转化为线性优化问题, 得

$$\min \sum_{i=1}^n W_i \Delta \sigma_i \quad (19)$$

$$\text{s.t. } \bar{\xi} - C_1 \leq \Delta \xi_i \leq \xi_i - C_2 \quad (20)$$

$$\Delta \sigma_i \leq \bar{\sigma} - \sigma_i \leq C_3 - \sigma_i \quad (21)$$

$$\Delta P_{\text{lacref}} = \Delta I_{\text{dc}} V_{\text{dc}} \quad (22)$$

$$\Delta P_{\text{lacref}} = \Delta \theta_s K_{\text{UPFC}} \frac{1+T_c s}{1+T_d s} \quad (23)$$

$$\Delta I_{\text{dc}} = \Delta V_{\text{sref}} \frac{T_w s}{1+T_w s} \left( \frac{1+T_a s}{1+T_b s} \right)^3 \quad (24)$$

$$P_{\text{lac0}} - P_{\text{lac min}} \leq \Delta P_{\text{lacref}} \leq P_{\text{lac max}} - P_{\text{lac0}} \quad (25)$$

$$V_{s0} - V_{s \text{min}} \leq \Delta V_{\text{sref}} \leq V_{s \text{max}} - V_{s0} \quad (26)$$

$$\bar{\xi} = \min \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \} + \varepsilon_\xi \geq 0.05 \quad (27)$$

$$\bar{\sigma} = \max \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n \} + \varepsilon_\sigma \leq 0 \quad (28)$$

式中:  $\bar{\xi}$ 、 $\bar{\sigma}$  分别为特征值阻尼比及特征值实部修正量;  $\varepsilon_\xi$ 、 $\varepsilon_\sigma$  分别为阻尼比及特征值实部的微变量。对式(19)一式(28)构成的优化方程, 采用粒子群优化算法<sup>[25-26]</sup>进行求解, 过程如图 4 所示。

图 4 实施步骤如下:

(1) 建立基于 VSC-HVDC 交直流混联系统的小信号模型, 计算引入 UPFC&DC-SDC 后的系统特征值  $\lambda$  以及阻尼比  $\xi$ 。阻尼比大于 5% 则结束, 若阻尼比小于 5%, 则进行第(2)步。

(2) 设定约束参数, 并根据阻尼比小于 5% 的振荡模式确定阻尼比修正量  $\bar{\xi}$  及特征值实部修正量  $\bar{\sigma}$ , 判定振荡模式的加权系数  $W_i$ 。

(3) 确定 UPFC 和 DC-SDC 的放大系数  $K_{\text{UPFC}}$ 、 $K_{\text{SDC}}$ , 计算 UPFC 的控制目标参数  $P_{\text{lacref}}$ 、 $V_{\text{sref}}$ , 计算 UPFC&DC-SDC 协调控制下系统的特征值阻尼比  $\xi$ , 若阻尼比小于 5%, 则重复步骤(2)直至计算结果收敛为止。

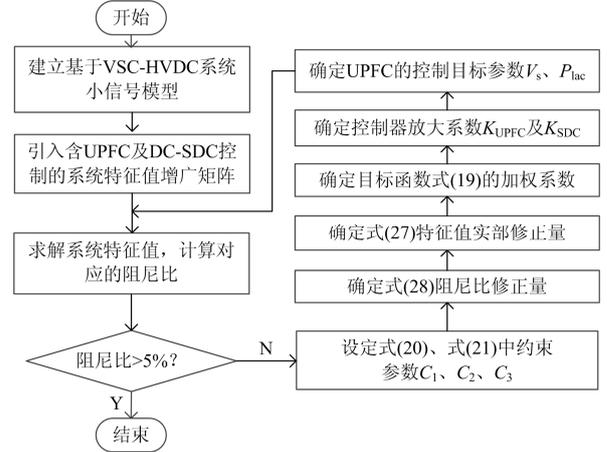


图 4 低频振荡抑制策略计算流程图

Fig. 4 Calculation steps of low frequency oscillation suppression strategy

### 3 仿真分析

以 CEPRI36v7 为测试对象, UPFC&DC-SDC 安装在 BUS33 上, UPFC 串联侧装于 BUS33-BUS34 线路, 如图 5 所示。

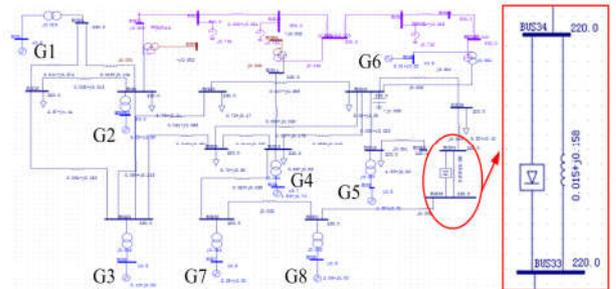


图 5 CEPRI36v7 系统单线图

Fig. 5 CEPRI36v7 single line diagram

对上述系统, 选定三种运行方式进行小干扰稳定分析, 分别为: 方式 1, 全运行方式; 方式 2, 发电机 G2 退出运行; 方式 3, 发电机 G4 退出运行。

各方式对应的低频振荡模式及其特征值分别如表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 运行方式 1 下系统特征值计算结果

Table 1 Calculation results of system eigenvalues under mode 1

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.021+j2.033	0.323 56	1.033
2	-0.035+j3.420	0.544 31	1.023
3	-0.117+j2.984	0.474 92	3.918

表 2 运行方式 2 下系统特征值计算结果

Table 2 Calculation results of system eigenvalues under mode 2

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.024+j2.547	0.405 37	0.942
2	-0.062+j3.153	0.501 82	1.966

表 3 运行方式 3 下系统特征值计算结果

Table 3 Calculation results of system eigenvalues under mode 3

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.039+j2.741	0.436 24	1.423
2	-0.073+j3.635	0.578 53	2.008
3	-0.128+j3.827	0.609 09	3.343

将上述各特征值代入式(12), 得到系统概率特征值, 如表 4 所示。

表 4 系统概率特征值计算结果

Table 4 Calculation results of system probabilistic eigenvalues

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.023+j2.410	0.383 56	0.954
2	-0.069+j3.472	0.552 59	1.987
3	-0.120+j3.337	0.531 10	3.594

对由式(19)一式(28)构成的优化方程, 设定其约束参数  $C_1 = 0.05$ 、 $C_2 = 0.2$ 、 $C_3 = -5$ ; 设定模式 1 加权系数  $W_1$  为 0.4, 模式 2 加权系数  $W_2$  为 0.2, 模式 3 加权系数  $W_3$  为 0.4, 非低频的振荡模式加权系数为 0。由图 4 的计算方法, 可得 UPFC&DC-SDC 控制系统的放大系数  $K_{UPFC} = 10$ 、 $K_{SDC} = 8$ , 其小干扰计算结果如表 5—表 7 所示。

由优化前后系统特征值计算结果对比可知, 运行方式 1 下阻尼比从 1.023%增大至 6.291%, 运行方式 2 下阻尼比从 0.942%增大至 5.712%, 运行方式 3 下阻尼比从 1.423%增大至 8.126%。

表 5 优化后运行方式 1 下系统特征值计算结果

Table 5 Calculation results of system eigenvalues under optimized operation mode 1

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.12+j2.102	0.334 54	5.700
2	-0.221+j3.506	0.558 00	6.291
3	-0.289+j3.251	0.517 41	9.128

表 6 优化后运行方式 2 下系统特征值计算结果

Table 6 Calculation results of system eigenvalues under optimized operation mode 2

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.149+j2.600	0.413 80	5.721
2	-0.285+j3.238	0.515 34	8.768

表 7 优化后运行方式 3 下系统特征值计算结果

Table 7 Calculation results of system eigenvalues under optimized operation mode 3

模式	特征值	频率/Hz	阻尼比/%
1	-0.226+j2.772	0.441 18	8.126
2	-0.299+j3.730	0.593 65	7.990
3	-0.314+j3.879	0.609 09	8.068

运行方式 1 下, 经 UPFC&DC-SDC 综合阻尼控制器控制前后的线路 BUS33-BUS34 小干扰时域响应波形如图 6 所示。

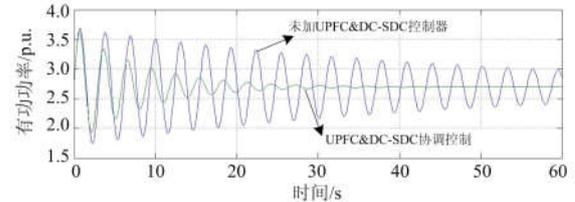


图 6 运行方式 1 下的目标线路有功功率波形

Fig. 6 Active power waveform of target line under operation mode 1

系统在受扰动后 10 s 时, 未加 UPFC&DC-SDC 控制器的系统功率振幅为 3.50 p.u., 且到 60 s 时其振幅仍有 2.97 p.u.; 加装 UPFC&DC-SDC 后, 系统在受扰动后 10 s 时其功率振幅减小为 3.05 p.u., 且在 45 s 系统功率振幅减小为 0, 系统达到稳定。

在运行方式 2 下, 如图 7 所示, 系统在受扰动后 10 s 时, 未加 UPFC&DC-SDC 控制器的系统功率振幅为 3.74 p.u., 且到 60 s 时, 其振幅仍有 3.22 p.u.; 加装 UPFC&DC-SDC 后, 系统在受扰动后 10 s 时其功率振幅减小为 3.24 p.u., 且在 30 s 时系统功率振幅减小为 0, 系统达到稳定。

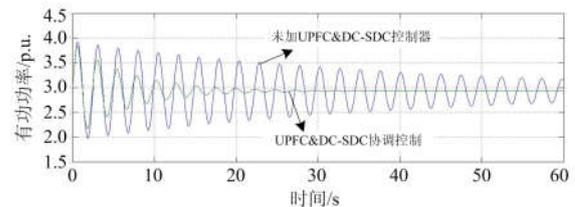


图 7 运行方式 2 下的目标线路有功功率波形

Fig. 7 Active power waveform of target line under operation mode 2

如图 8 所示, 在运行方式 3 下, 系统在受扰动后 10 s 时, 未加 UPFC&DC-SDC 控制器的系统功率振幅为 3.12 p.u., 且到 60 s 时, 其振幅仍有 2.52 p.u.; 加装 UPFC&DC-SDC, 系统在受扰动后 10 s 时其功率振幅减小为 2.54 p.u., 且在 23 s 时系统功率振幅减小为 0, 系统达到稳定。

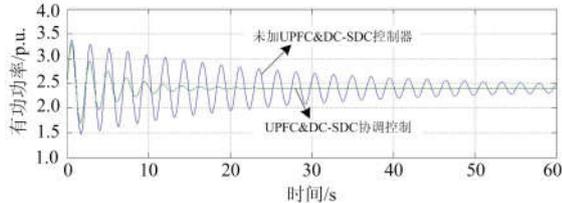


图 8 运行方式 3 下的目标线路有功功率波形

Fig. 8 Active power waveform of target line under operation mode 3

## 4 结论

本文针对基于 VSC-HVDC 交直流混联系统的小干扰低频振荡问题, 提出了一种将 UPFC 及 DC-SDC 相结合的协调控制系统, 并给出了该系统参数确定的优化方法, 得到如下结论:

(1) 本文所提方法可使系统初始振荡模式阻尼比均提高至 5% 以上, 有效提高系统的小干扰稳定性。

(2) 本文所提方法在运行方式 1 下系统需 45 s 可恢复稳定, 且前 10 s 振荡衰减速度提高了 47.37%; 在运行方式 2 下需 30 s 恢复稳定, 且前 10 s 振荡衰减速度提高了 51.02%; 在运行方式 3 下仅需 23 s 恢复稳定, 且前 10 s 振荡衰减速度提高了 55.77%。

## 参考文献

- [1] 谭阳琛, 刘畅, 李程昊, 等. 基于 ADPSS 的特高压直流输电控制保护系统开放式建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 99-108.  
TAN Yangchen, LIU Chang, LI Chenghao, et al. Open-style model of UHVDC control and protection system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 99-108.
- [2] 余超耘, 杨汾艳, 盛超, 等. 高压直流输电线路入口端谐波阻抗特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 93-100.  
YU Chaoyun, YANG Fenyan, SHENG Chao, et al. Research on the characteristics of harmonic impedance at the inlet of HVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 93-100.
- [3] WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. A virtual phase-lead impedance stability control strategy for the maritime VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(12): 5475-5486.
- [4] LIN Sheng, WANG Liang, MU Dalin, et al. Research on starting-up control strategy of VSC-HVDC system[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(16): 1957-1965.
- [5] 徐伟, 夏小琴, 赵静波, 等. 基于电气距离的低频振荡关联区域和模式类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 24-30.  
XU Wei, XIA Xiaoqin, ZHAO Jingbo, et al. Relevant zone and mode type identification based on electrical distance for low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 24-30.
- [6] 吴跨宇, 沈轶君, 韩兵, 等. 新型 PSS-NB 模型参数整定与工程化应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 106-111.  
WU Kuayu, SHEN Yijun, HAN Bing, et al. Spectrum analysis of nonstationary vibration signal for wind turbine gear box[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 106-111.
- [7] MAGALLONES T G, SINGH J G. Small signal stability and transient stability analysis on the Philippine-Sabah power interconnection[C] // 2016 International Conference on Cogeneration, September 14-16, 2016, Bangkok, Thailand: 168-174.
- [8] HU Wenping, LIANG Jifeng, JIN Yitao, et al. Online evaluation method for low frequency oscillation stability in a power system based on improved XGboost[J]. Energies, 2018, 11(11): 1-18.
- [9] 任必兴, 杜文娟, 王海风, 等. 基于阻尼转矩分析法的 UPFC 阻尼通道选取与附加稳定器的协调设计[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 61-67.  
REN Bixing, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Damping channel selection based on damping torque analysis and coordinated design of auxiliary stabilizer for UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 61-67.
- [10] KARIM C A B, ZAMEE M A. Design and analysis of pole-placement controller for dynamic stability improvement of VSC-HVDC based power system[C] // 2014 9th International Forum on Strategic Technology, October 21-23, 2014, Chittagong, Bangladesh: 212-217.
- [11] 张英敏, 刘凯. 基于同伦变换的 VSC-HVDC 分散协调鲁棒阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2093-2102.  
ZHANG Yingmin, LIU Kai. Design of decentralized robust damping controller for VSC-HVDC transmission system based on Homotopic transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2093-2102.

- [12] 丁媛媛, 刘天琪. 基于等效解耦过程的交直流协调控制鲁棒稳定性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1951-1956.  
DING Yuanyuan, LIU Tianqi. Research on coordinated control robust stability index of HVDC and PSS supplementary damping control based on effective open-loop process theorem[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1951-1956.
- [13] 郭春义, 蒋雯, 殷子寒, 等. 弱交流电网下含STATCOM的LCC-HVDC系统的附加阻尼协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5957-5964.  
GUO Chunyi, JIANG Wen, YIN Zihan, et al. Impact of STATCOM on the small-signal stability margin of LCC-HVDC under weak AC grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5957-5964.
- [14] ALBASH F M, MEKHILEF S, Ahmad S, et al. Fuzzy-logic-based UPFC and laboratory prototype validation for dynamic power flow control in transmission lines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9538-9548.
- [15] AHMED F, DARYOOSH N. UPFC performance control in distribution networks for DG sources in the islanding[J]. Transactions on Electrical and Electronic Materials, 2017, 18(5): 303-309.
- [16] LAVERDE J S, RIOS M A. Damping electromechanical oscillations using supplementary controls at VSC-HVDC stations based on reduced low order models[J]. Control Engineering Practice, 2018, 79(10): 195-208.
- [17] 盛立健, 孙军, 王海龙, 等. 智能电网环境下分布式阻尼控制器设计[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 67-73.  
SHENG Lijian, SUN Jun, WANG Hailong, et al. Design of distributed damping controller in smart grid[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 67-73.
- [18] 刘昇. 含VSC-HVDC的交直流电力系统建模、分析与控制相关问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
LIU Sheng. Modeling, analysis and control of AC/DC power system containing VSC-HVDCs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [19] 李兰芳. 输电系统SVC电压调节器增益自适应控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 61-66.  
LI Lanfang. Gain adaptive control method of the voltage regulator for SVC in transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 61-66.
- [20] KUMAR M J, DASH S S, IMMANUVELA S P, et al. Comparison of FBLC (feed-back linearization) and PI-controller for UPFC to enhance transient stability[C] // 2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET), March 18-19, 2011, Paris, France.
- [21] 林克曼. 新型磁控可调电抗器抑制电力系统低频振荡研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
LIN Keman. Research on damping low in cooperating new type of saturated-core controllable reactor[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [22] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 98-104.  
ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 98-104.
- [23] PREECE R, MILANOVIC J V, ALMUTAIRI A M, et al. Damping of inter-area oscillations in mixed AC/DC networks using WAMS based supplementary controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1160-1169.
- [24] AHMAD S, KHAN L. Adaptive feedback linearization control for power oscillations damping in AC/DC power system[C] // 2015 13th International Conference on Frontiers of Information Technology, December 14-16, 2015, Islamabad, Pakistan: 199-204.
- [25] MANA A, MUNLIN M A. Radius particle swarm optimization[C] // 2013 International Computer Science and Engineering Conference, September 4-6, 2013, Hangzhou, China: 127-130.
- [26] MELLAL M A, ZIO E. An adaptive particle swarm optimization method for multi-objective system reliability optimization[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(6): 990-1001.

收稿日期: 2019-09-13; 修回日期: 2019-11-03

作者简介:

刘俊磊(1985—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为交直流电网安全稳定分析、电网运行管理;

乔小敏(1982—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统建模与仿真。E-mail: 375943243@qq.com

(编辑 张爱琴)