

高压直流附加控制对强迫振荡的抑制作用

徐衍会¹, 李真¹, 伍双喜²

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510060)

摘要:强迫振荡成为电网动态稳定的主要问题之一,可能引起区域联络线有功功率大幅振荡。分析了多机系统强迫振荡的原理,设计了高压直流附加阻尼控制器,分析了不同扰动源位置、频率以及直流输送功率下高压直流附加控制器对强迫振荡的抑制效果。2区4机交直流系统的仿真结果表明,高压直流附加控制器对强迫振荡的抑制效果与扰动源位置关系不大,主要取决于扰动源频率和直流输电功率水平;当扰动源频率等于区域间振荡频率时,抑制效果最佳;直流输送功率越大,强迫振荡的抑制效果越好。

关键词:强迫振荡;高压直流输电;附加控制器;交直流系统;动态稳定

中图分类号:TM 721.1

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.022

0 引言

随着电网规模日益扩大,低频振荡现象时有发生。1996年和2000年美国西部联合电网(WSCC)系统发生低频振荡^[1-2],造成电网解列,损失大量负荷。2008年8月,云南文山地区发生负阻尼低频振荡^[3]。电力系统稳定器(PSS)是抑制低频振荡的有效手段^[4]。从运行效果来看,PSS对本地模式振荡的抑制效果明显,但是对区域间振荡的抑制效果不佳。高压直流输电具有输送功率大、输送距离远、功率调节快等优点,在大容量、远距离的区域互联中已得到了广泛的应用^[5-6]。利用高压直流系统设计附加阻尼控制器以抑制弱阻尼振荡得到了广泛的研究。文献[7]利用测试信号法与根轨迹法设计直流附加阻尼控制器。文献[8]提出一种系统化的大规模交直流电力系统中基于广域测量信息的直流阻尼调制信号的筛选和集成方法。文献[9]以区域间暂态能量下降为目标,设计直流模糊阻尼控制器以提高系统间阻尼。文献[10]提出一种基于相量测量单元(PMU)的直流附加控制器,该控制器以不同区域的电压相角差作为输入信号。文献[11]利用广域测量系统的测量信息,采用协同控制(SGC)理论设计了一种非线性直流附加控制器。

随着电力系统网架结构的增强以及系统中各类阻尼控制装置的完善,传统的弱阻尼振荡已经较少发生,强迫振荡成为电网小扰动稳定的主要问题之

一^[12-13]。1994年南方电网因贵州乌江水电厂出力增加,发生“4.26”强迫振荡^[14];2008年4月云南大唐红河2号机组阀门开度出现较大幅度波动,引发主网出现强迫型功率振荡^[3];2011年南方电网因汽轮机发电机组一次调频试验引发电网发生强迫振荡^[15];2013年南方电网某电厂因汽轮机阀门控制方式切换引发了强迫振荡现象^[16]。文献[17]以单机无穷大系统为例对强迫振荡机理进行了分析,并针对高压直流对系统稳定性的影响进行了相关研究。文献[18]研究了局部弱联诱发互联电网发生区域强迫振荡的机制,并分析了强迫振荡的影响因素。但以上文献并没有给出强迫振荡的具体抑制措施。关于利用高压直流附加控制抑制强迫振荡的效果和影响因素的研究还鲜有报道。本文首先分析强迫功率振荡的原理,然后设计高压直流附加阻尼控制器,分析不同扰动源位置、频率以及直流输送功率下高压直流附加控制器对强迫振荡的抑制效果。

1 多机系统强迫振荡原理

在有 n 台发电机的系统中,发电机采用经典模型并考虑机械阻尼,线性化后的系统方程可表示成:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_{li} \\ M_i \Delta \dot{\omega}_{li} = -K_{Di} \Delta \omega_{li} - K_{Si} \Delta \delta_i \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

其中, $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为系统基准角频率, f_0 为系统基准频率; ω_{li} 为第 i 台发电机的转速; δ_i 为第 i 台发电机功角; Δ 表示相应变量的变化量; K_D 为阻尼转矩系数; K_S 为同步转矩系数; M 为惯性常数。若定义 $x_i = \Delta \delta_i / \omega_0$,则式(1)可以转换成:

$$\ddot{x}_i = -M_i^{-1} K_{Di} \dot{x}_i - M_i^{-1} K_{Si} \omega_0 x_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

令 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,则式(2)可以改写为:

$$\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_S \omega_0 \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (3)$$

系统受到扰动时,多机系统的振荡方程可写为:

收稿日期:2017-05-28;修回日期:2018-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677066);广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM00000028);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS007,2018ZD01)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677066), the Science & Technology Program of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM00000028) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS007, 2018ZD01)

$$\ddot{\mathbf{X}} + M^{-1}K_D\dot{\mathbf{X}} + M^{-1}K_S\omega_0\mathbf{X} = \mathbf{B}F\sin(\omega_d t) \quad (4)$$

其中, F 为扰动的幅值; ω_d 为扰动频率; \mathbf{B} 为扰动源的位置, 是一个列向量。因为 $M^{-1}K_S\omega_0 \gg M^{-1}K_D$, 满足解耦条件, 令 $\mathbf{X} = \boldsymbol{\varphi}\mathbf{Z}$, 则式(4)可以解耦表示为:

$$\ddot{\mathbf{Z}} + K_{DN}\dot{\mathbf{Z}} + \omega_0 K_{SN}\mathbf{Z} = \boldsymbol{\psi}F_N\sin(\omega_d t) \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{\varphi}^T$; $K_{DN} = \boldsymbol{\psi}M^{-1}K_D\boldsymbol{\varphi}$; $K_{SN} = \boldsymbol{\psi}M^{-1}K_S\boldsymbol{\varphi}$; $F_N = \mathbf{B}F$ 。

当扰动源为单扰动源时, 第 i 阶振荡模式为:

$$\ddot{z}_i + 2\xi_i\omega_i\dot{z}_i + \omega_i^2 z_i = \psi_{ik}F_N\sin(\omega_d t) \quad (6)$$

其中, ξ_i 为第 i 个振荡的阻尼比; ω_i 为第 i 个振荡的固有频率; ψ_{ik} 为该扰动源对第 i 个振荡模式的权重; F_N 为扰动幅值。

振动方程式(6)的特解为:

$$\begin{cases} z_{i2} = \psi_{ik}F_i\sin(\omega_d t - \theta_i) \\ F_i = \frac{F_N}{\omega_i^2} \frac{1}{\sqrt{(1-\nu_i^2)^2 + (2\xi_i\nu_i)^2}} \\ \theta_i = \arctan \frac{2\xi_i\nu_i}{1-\nu_i^2} \\ \nu_i = \omega_d/\omega_i \end{cases} \quad (7)$$

当存在扰动源时, 系统的振荡由两部分组成, 其中, 自由振荡部分受 ξ_i 的作用不断衰减至 0; 强迫振荡部分为等幅振荡, 振荡幅值与阻尼比 ξ_i 、固有振荡频率 ω_i 、权重 ψ_{ik} 有关。阻尼比越小, 扰动源频率 ω_d 越接近固有振荡频率 ω_i , 幅值 F_i 越大。故通过提高阻尼比 ξ_i 可降低幅值 F_i , 进而降低强迫振荡幅值。

2 高压直流附加阻尼控制器设计

选择交流联络线输送有功功率 P_{ac} 作为高压直流附加阻尼控制器的输入信号, 输出信号加在整流侧定电流控制器上, 其传递函数为 $H(s)$, 构成闭环传递函数, 如图 1 所示。图中, ΔP_{ac} 为交流联络线功率增量; ΔP_{dc} 为直流线路功率增量; ΔI 为电流增量。

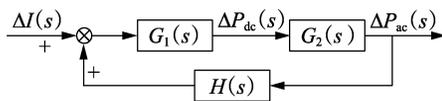


图 1 系统闭环传递函数

Fig.1 Closed-loop transfer function of system

附加阻尼控制器采用单输入单输出超前滞后补偿系统, 结构如图 2 所示。图中, P_{ac} 为交流联络线

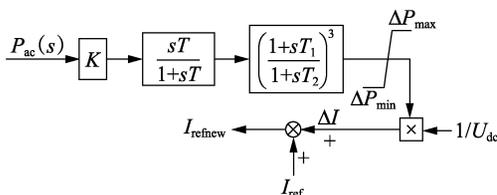


图 2 附加阻尼控制器结构框图

Fig.2 Structure diagram of supplementary damping controller

输送有功功率; I_{ref} 为直流定电流原参考值; I_{refnew} 为直流定电流新参考值。

附加阻尼控制器中的参数 T 、 T_1 、 ΔP_{max} 、 ΔP_{min} 采用典型值, 分别取为 10 s、0.55 s、25 MW、-25 MW; T_2 、 K 采用极点配置法求得^[7]。校正后系统具有一对主导极点 (s_d), 系统的暂态响应应该由该主导极点决定, 主导极点 (s_d) 满足式(8)、(9)。

$$|H(s_d)| = \frac{1}{|G_1(s_d)G_2(s_d)|} \quad (8)$$

$$\angle H(s_d) = -\angle G_1(s_d)G_2(s_d) \quad (9)$$

采用测试信号法得系统开环传递函数 $G_o(s)$ 的幅频、相频特性曲线, 如图 3 所示; 通过模态拟合得到 $G_o(s)$, 其伯德图如图 4 所示。

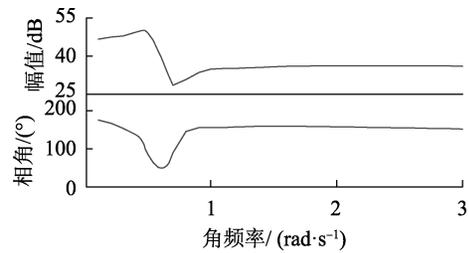


图 3 系统的幅频和相频特性曲线

Fig.3 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curves of system

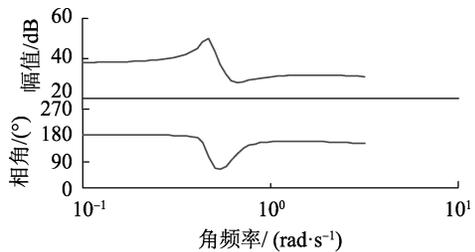


图 4 开环传递函数的伯德图

Fig.4 Bode diagram of open-loop transfer function

模态辨识得到的系统开环传递函数 $G_o(s)$ 为:

$$G_o(s) = \frac{-10.24s^3 - 1159s^2 - 1442s - 17720}{s^3 + 27.2s^2 + 18.01s + 232.6} \quad (10)$$

开环传递函数 $G_o(s)$ 的极点为 -26.850 6、-0.174 1+j2.937 8、-0.174 1-j2.937 8, 其中共轭复根为传递函数的一对主导极点, 它对应于 $f = 0.468$ Hz、 $\xi = 0.059$ 的振荡模式。将校正后区域间的振荡模式选为 $s_d = -1.79 \pm j3.1$, 对应的振荡频率为 $f_d = 0.5$ Hz, 阻尼比 $\xi_d = 0.5$, 将 $s_d = -1.79 \pm j3.1$ 代入辨识所得的传递函数 $G_o(s)$ 中, 得 $|G(s_d)| = 45.73$ 、 $\angle G(s_d) = -152.03^\circ$ 。将上述结果代入式(8)、(9), 得到高压直流附加控制器的整定参数为: $T_2 = 0.18$ s, $K = 0.68$ 。

3 直流附加控制抑制强迫振荡分析

在 PSCAD 中搭建图 5 所示交直流并联 2 区 4 机系统, 用以研究直流附加控制对交流线路强迫振

荡的抑制作用。2 个区域各有 2 台额定容量为 900 MV·A 的机组,区域间传输有功功率为 420 MW,直流输电线路额定电压为 400 kV,额定功率为 400 MW。发电机、变压器、输电线路、负荷参数见文献[19]。

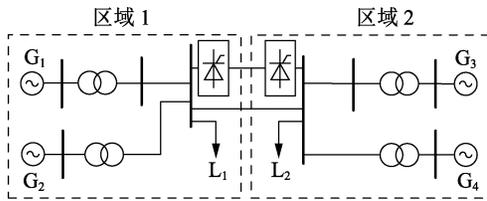


图 5 2 区 4 机交直流系统

Fig.5 2-area 4-machine AC-DC hybrid system

当系统交流联络线发生三相瞬时故障时,直流附加阻尼控制器投入前、后的交流线路功率见图 6。

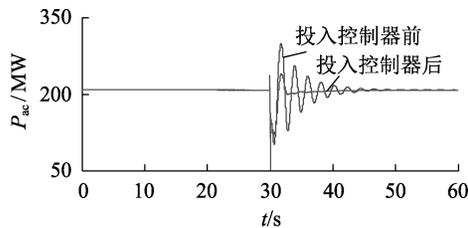


图 6 直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.6 Comparison of active power in AC transmission line between with and without HVDC supplementary damping controller

从图 6 可以看出,投入直流附加阻尼控制器后,交流线路功率振荡衰减加快,系统的阻尼得到了改善。然后,分析高压直流附加阻尼控制器对强迫功率振荡的抑制效果。通过小扰动频域分析可以求得区域间振荡频率为 0.468 Hz,该模态下的左、右特征向量及参与因子见表 1。

表 1 特征值与参与因子

Table 1 Eigenvalues and participation factors

发电机	左特征值	右特征值	参与因子
G ₁	0.008 26	0.028 04	0.140 61
G ₂	0.005 40	0.028 24	0.092 61
G ₃	0.008 43	0.162 48	0.831 94
G ₄	0.005 24	0.151 01	0.480 53

3.1 扰动源位置不同

分别在发电机 G₁—G₄ 施加频率为 0.468 Hz 的正弦扰动,直流附加控制器投入前、后交流联络线功率变化如图 7—10 所示。

可以看出,强迫振荡的幅值与左特征值向量有关,即式(7)中的 ψ_{ik} ,左特征值向量越大,强迫振荡的幅值越大。即不同位置扰动源作用下,高压直流附加控制均能够有效地抑制交流联络线功率振荡。

为了验证不同电气距离下该高压直流附加控制器的抑制效果,将 2 区 4 机交直流仿真系统中的发电机 G₁ 与整流侧母线之间的联络线由 35 km 改为

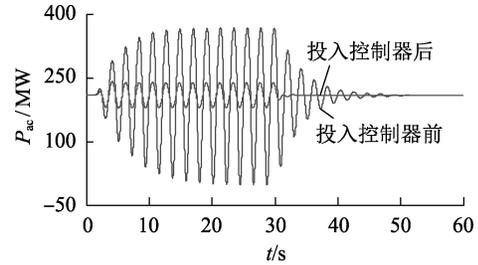


图 7 扰动源位于 G₁ 处时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.7 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance source is located at G₁

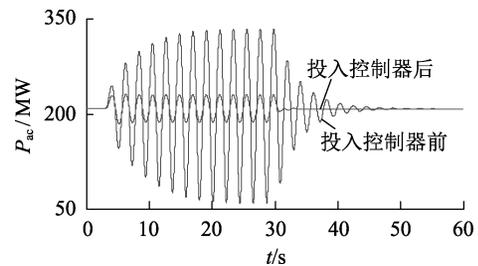


图 8 扰动源位于 G₂ 处时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.8 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance source is located at G₂

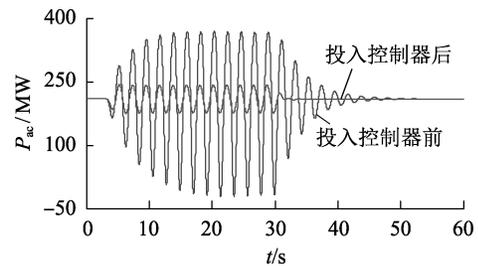


图 9 扰动源位于 G₃ 处时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.9 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance source is located at G₃

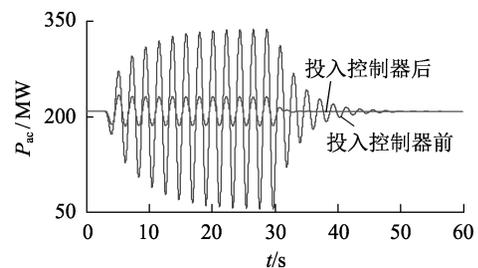


图 10 扰动源位于 G₄ 处时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.10 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance source is located at G₄

60 km。附加控制器投入前、后 P_{ac} 的变化曲线见图 11。

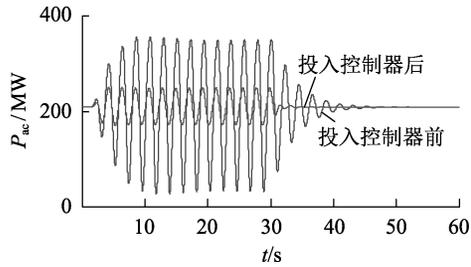


图 11 G_1 至换流站线路距离为 60 km 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.11 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when line distance between G_1 and converter station is 60 km

对比图 7、11 可看出,扰动源的电气距离变远时,交流联络线功率强迫振荡的幅值有所下降,高压直流附加阻尼控制器对强迫振荡的抑制效果略有下降。

3.2 扰动源频率不同

将扰动源置于发电机 G_1 处,扰动频率为 0.468 Hz、0.7 Hz、1.5 Hz 时,附加控制器投入前、后 P_{ac} 的变化曲线分别如图 7、图 12、图 13 所示。

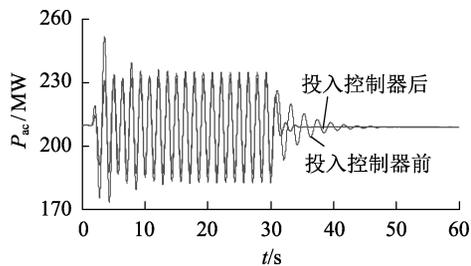


图 12 扰动频率为 0.7 Hz 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.12 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance frequency is 0.7 Hz

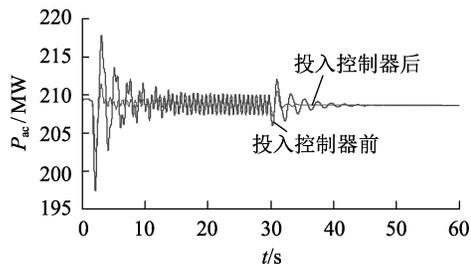


图 13 扰动频率为 1.5 Hz 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.13 Comparison of active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller, when disturbance frequency is 1.5 Hz

可以看出,不同扰动源频率作用下,高压直流附加控制对强迫振荡的抑制效果存在明显不同,扰动

源频率对高压直流附加控制抑制强迫振荡的影响需要进一步研究。

将直流附加控制投入的前有功功率振荡幅值记为 ΔP ,投入后的交流线路有功功率振荡幅值记为 $\Delta P'$,定义抑制比 S_r 为:

$$S_r = \Delta P' / \Delta P \quad (11)$$

通过比较抑制比 S_r 的大小来评价高压直流附加控制抑制强迫振荡的效果, S_r 越小,抑制效果越佳。

附加控制器投入前、后 P_{ac} 振荡幅值见表 2。

表 2 直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率和抑制比

Table 2 Active power in AC tie-line between with and without HVDC supplementary damping controller and suppression ratios

f / Hz	ΔP / MW	$\Delta P'$ / MW	S_r
0.2	42.72	30.47	0.713 2
0.3	60.6	34.81	0.574 4
0.4	98.81	32.26	0.326 5
0.468	145.5	23.23	0.159 7
0.5	135	29.94	0.221 8
0.6	46.54	30.1	0.646 8
0.7	26.12	22.36	0.856 0
0.8	18.97	13.94	0.734 8
0.9	15.95	9.5	0.595 6
1.0	12.34	6.192	0.501 8
1.1	6.008	2.777	0.462 2
1.2	2.817	1.215	0.431 3
1.3	1.814	0.7271	0.400 8
1.4	1.476	0.5537	0.375 1
1.5	1.301	0.4607	0.354 1

S_r 随扰动频率 f 的变化情况曲线见图 14。

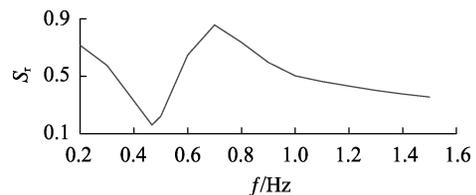


图 14 抑制比与扰动频率的关系

Fig.14 Relationship between suppression ratio and disturbance frequency

从表 2 和图 14 可以看出,高压直流附加控制器对强迫振荡的抑制效果与扰动频率有关,当扰动频率为区域间振荡频率时,抑制比最小,抑制效果最佳。因为该高压直流附加控制器是基于区域间振荡模式而设计的,故对扰动源频率与区域间振荡频率相接近的扰动具有最好的抑制效果,随着扰动源频率偏离区域振荡模式频率,抑制效果有所下降。

3.3 直流传输功率不同

扰动源位于发电机 G_1 处,扰动频率为区域间振荡频率。通过设定整流侧定电流控制的参考电流,

改变直流传输功率的大小,观察附加控制器投入前、后 P_{ac} 变化曲线。当直流传输功率为 106 MW、170 MW、404 MW 时,仿真结果分别如图 15—17 所示。

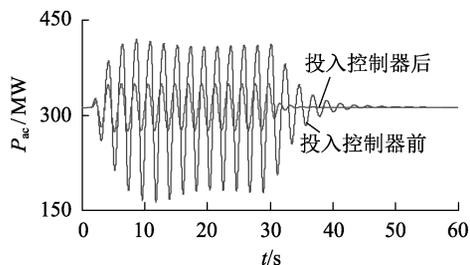


图 15 当直流输送功率为 106 MW 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.15 Comparison of active power in AC transmission line between with and without HVDC supplementary damping controller, when DC transmission power is 106 MW

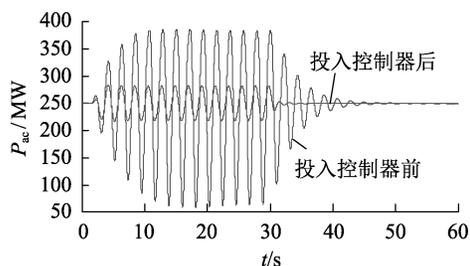


图 16 当直流输送功率为 170 MW 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.16 Comparison of active power in AC transmission line between with and without HVDC supplementary damping controller, when DC transmission power is 170 MW

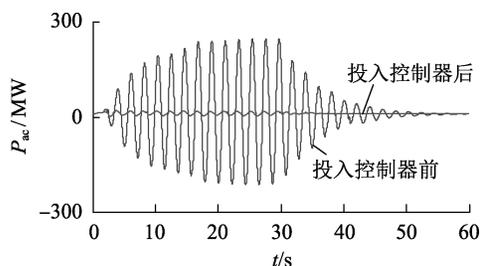


图 17 当直流输送功率为 404 MW 时直流附加阻尼控制器投入前、后交流线路功率对比

Fig.17 Comparison of active power in AC transmission line between with and without HVDC supplementary damping controller, when DC transmission power is 404 MW

从图中可看出,随着直流输送功率的增加,高压直流附加控制器对强迫振荡的抑制效果不断增强。

4 结论

本文设计了高压直流附加阻尼控制器,分析了该附加控制器对强迫功率振荡的抑制效果。仿真结果表明:

a. 高压直流附加阻尼控制器对强迫振荡的抑制效果主要取决于扰动源频率和高压直流输电功率传输水平;

b. 当扰动源频率为区域间振荡频率时,抑制比最小,联络线强迫功率振荡的抑制效果最佳;

c. 高压直流输电功率水平越高,附加控制对交流联络线强迫功率振荡的抑制作用越强;

d. 扰动源距离高压直流换流站母线的电气距离增加时,直流附加控制器抑制强迫振荡的效果略有下降。

参考文献:

- [1] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for August 10, 1996 WSCC system outage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [2] KOSTEREV D N, MITTELSTADT W A, VILES M, et al. Model validation and analysis of WSCC system oscillations following alberta separation on August 4, 2000 [R]. [S.l.]: Bonneville Power Administration and BC Hydro, 2001.
- [3] 梁志飞, 肖鸣, 张昆, 等. 南方电网低频振荡控制策略探讨 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 54-58.
LIANG Zhifei, XIAO Ming, ZHANG Kun, et al. Discussion on low frequency oscillation control strategy of China Southern Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 54-58.
- [4] CHOMPOOBUTRGOOL Y, VANFRETTI L, GHANDHARI M. Survey on power system stabilizers control and their prospective applications for power system damping using synchrophasor-based wide-area systems [J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(8): 2098-2111.
- [5] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [6] 王曦, 李兴源, 魏巍, 等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协调控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 102-108.
WANG Xi, LI Xingyuan, WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 102-108.
- [7] 刘海峰, 徐政. 基于测试信号的直流小信号调制器参数整定 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 12-16.
LIU Haifeng, XU Zheng. Parameters tuning of HVDC small signal modulation controllers based on test signal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 12-16.
- [8] 徐光虎, 孙衢, 陈陈. HVDC 模糊协调阻尼控制器的设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 18-23.
XU Guanghu, SUN Qu, CHEN Chen. Design of HVDC fuzzy coordinated damping controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 18-23.
- [9] 毛晓明, 张尧, 管霖. 基于广域测量信息的直流调制新方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 45-49.
MAO Xiaoming, ZHANG Yao, GUAN Lin. A new method of DC modulation based on wide area measurement information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 45-49.
- [10] HUANG Y, XU Z. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units [C] // Power Systems Conference and Exposition, 2004. [S.l.]: IEEE, 2004: 668-672.
- [11] 邹延生, 董萍. 基于协同控制理论的非线性直流附加控制器设计 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 210-217.

- ZOU Yansheng, DONG Ping. Design of nonlinear HVDC supplementary controller based on synergetic control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 210-217.
- [12] 耿天翔,张竹竞,项丽,等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 98-103. GENG Tianxiang, ZHANG Zhuqing, XIANG Li, et al. A locating and splitting scheme for disturbance source of forced power oscillation based on the propagation characteristic [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 98-103.
- [13] 蒋平,郑斌青,冯双. 基于功率及频率波动相位的强迫扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 112-117. JIANG Ping, ZHENG Binqing, FENG Shuang. Forced disturbance-source locating based on phase-angle between power and frequency fluctuations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 112-117.
- [14] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡分析[J]. 电网技术, 1995, 19(12): 6-10. TANG Yong. The analysis of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 1995, 19(12): 6-10.
- [15] 徐衍会,王珍珍,翁洪杰. 一次调频试验引发低频振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 119-124. XU Yanhui, WANG Zhenzhen, WENG Hongjie. Example and mechanism analysis of low frequency oscillation caused by primary frequency modulation test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 119-124.
- [16] 徐衍会,马聪,邓小文,等. 汽轮机阀门控制方式切换引发低频振荡的实例及其机理分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 170-174. XU Yanhui, MA Cong, DENG Xiaowen, et al. Example and mechanism analysis of low frequency oscillation caused by valve control mode switching of steam turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 170-174.
- [17] 史华勃,刘天琪,李兴源. 交直流输电系统低频振荡仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 47-52. SHI Huabo, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Simulation analysis on low frequency oscillation in the AC/DC transmission system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 47-52.
- [18] 顾丽鸿,周孝信,陶洪铸,等. 局部弱联诱发互联电网强迫振荡机制分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 36-43. GU Lihong, ZHOU Xiaoxin, TAO Hongzhu, et al. Analysis on mechanism of inter-area forced oscillation caused by local weak interconnection in interconnected power grid [J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 36-43.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 700-822, 1151-1160.

作者简介:



徐衍会

徐衍会(1978—),男,黑龙江海林人,副教授,博士,主要研究方向为动态电力系统分析与负荷建模(**E-mail**: xuyanhui23@sohu.com);

李真(1993—),女,河北南宫人,硕士研究生,研究方向为电力系统强迫功率振荡的分析与抑制(**E-mail**: 15122526602@

163.com);

伍双喜(1984—),男,湖南衡阳人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统建模与仿真、参数辨识。

Mitigation effect of HVDC supplementary control on forced oscillation

XU Yanhui¹, LI Zhen¹, WU Shuangxi²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The forced oscillation is one of the main problems of power grid dynamic stability and may cause high amplitude active power oscillation in the area tie line. The principle of forced oscillation in multi-machine system is analyzed and the HVDC supplementary damping controller is designed to analyze its mitigation effect on the forced oscillation under different locations and frequencies of disturbance source and different HVDC transmission power. Simulative results of the 2-area 4-machine AC-DC hybrid system show that the mitigation effect of HVDC supplementary controller on the forced oscillation is not very relevant to the location of disturbance source, while mainly depends on the frequency of disturbance source and the transmission power level of HVDC. When the frequency of disturbance source is equal to the inter-area oscillation frequency, the mitigation effect is the best, and the higher the HVDC transmission power is, the better the mitigation effect will be.

Key words: forced oscillation; HVDC power transmission; supplementary controller; AC-DC hybrid system; dynamic stability