

混合多端直流输电系统附加控制器设计

张立奎, 张英敏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对包含混合多端直流的交直流互联系统区间低频振荡现象, 提出一种基于射影控制原理的控制器降阶设计方法。搭建混合三端直流输电系统, 确定控制策略, 利用总体最小二乘-旋转不变技术辨识出系统开环模型。得出系统状态反馈增益矩阵, 保留闭环系统主导特征值, 基于射影控制原理设计低阶输出反馈控制器, 并基于线性矩阵不等式设计 H_2/H_∞ 阻尼控制器进行比较。测试系统的特征值分析和时域仿真结果表明: 射影控制器不仅阶数低, 而且具有更好的阻尼特性和鲁棒性。

关键词: 混合直流; 低频振荡; 射影原理; 输出反馈; 阻尼控制

Design of additional controller for hybrid multi-terminal DC transmission system

ZHANG Likui, ZHANG Yingmin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As to the low frequency oscillation of AC/DC parallel power system which contains hybrid multi-terminal DC, a reduced-order controller design method based on the principle of projective control is introduced. Three-terminal hybrid DC transmission system is built, and the control strategy is determined. The model of the system is identified by the least square-estimation method via rotational technique (TLS-ESPRIT), a state feedback gain matrix is obtained, and dominant eigenvalue of the closed-loop system is retained, then a low-order output feedback controller is designed by projective control, and a H_2/H_∞ damping controller based on linear matrix inequalities is compared. Finally, the results of the eigenvalue analysis and digital simulation of the testing system show that projective controller has lower order, stronger robustness and better damping characteristics.

Key words: hybrid direct current; low frequency oscillation; projective control; output feedback; damping control

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2016)02-0128-06

0 引言

随着传统能源的日益短缺和环境问题日益突出, 新能源尤其是清洁可再生能源的开发和利用越来越受到人们的重视。但太阳能、风能等新能源分布广, 发电具有间歇性、随机性的特点, 使得传统的电网结构和运行技术难以大规模接入新能源^[1-3]。基于电流源型换流器(Line Commuted Converter, LCC)的传统直流特点是高电压、大容量、远距离输送, 其逆变端需要有源网络的电压提供换相支撑, 而基于电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)的柔性直流有可向无源网络供电、可独立控制与交流侧交换的有功和无功、逆变端不存在换相失

败等诸多优势。由于这些特点, 柔性直流可广泛用于可再生能源接入、孤岛供电、城市供电等领域^[4-7]。因此, 在现有传统直流的基础上, 接入VSC换流站, 将系统扩展为混合多端直流输电系统应该是大规模新能源接入电网的有效方法之一。

混合直流的设想早在1994年由文献[8]提出。近年来, 许多学者关于混合直流的实现和应用做了较多研究。文献[9]推导了混合双端直流输电系统的稳态数学模型, 并设计相应协调控制策略。文献[10]提出了混合双端直流输电系统的启动方法, 将启动过程分为三个阶段完成, 取得了一定的效果。文献[11]分析了混合直流输电的技术特点, 通过仿真验证系统能够平稳传输, 还可以快速从故障状态恢复稳定运行。文献[12-13]研究了多端混合直流输电系统的控制策略, 将系统应用于海上风电场并网, 通

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGQJHY00GHJS1400044)

过仿真表明系统具有较好的运行特性。文献[14-15]用比较灵敏度系数评估多端直流系统的动态稳定性, 研究表明采用有功功率调制能极大地改善系统阻尼特性。目前, 国内主要研究侧重于混合直流输电系统本身控制策略, 鲜有文献研究混合直流的附加阻尼控制。但区域间低频振荡是电力系统的重要问题之一, 而现有大多附加阻尼控制器设计方法存在阶数过高问题, 影响控制器的实用性和有效性。

本文在研究混合多端直流输电系统控制策略基础上, 提出一种基于射影控制理论的低阶控制器设计方法。运用总体最小二乘-旋转不变技术(TLS-ESPRIT)辨识出系统的等值开环模型, 利用传统极点配置方法求出系统状态反馈矩阵, 保留其主导特征值并通过射影控制理论将其转换为输出反馈。最后, 将设计出的低阶射影控制器与基于线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities, LMI)理论的高阶 H_2 / H_∞ 阻尼控制器进行比较。在 PSCAD/EMTDC 中搭建三端混合直流输电模型, 通过系统仿真表明, 射影阻尼控制器不仅阶数低, 而且更能有效抑制区域间低频振荡。

1 混合多端直流输电系统控制策略

本文在四机两域交直流混合输电测试系统的基础上, 增加一个额定传输功率为 50 MW 的电压源型换流站, 将两端直流输电系统扩展为含有 LCC 整流站、LCC 逆变站及 VSC 换流站的三端直流输电系统, 如图 1 所示。

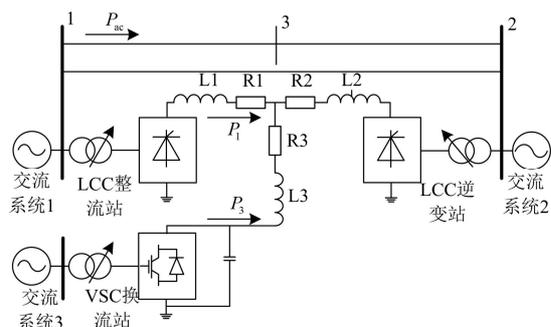


图 1 混合多端直流输电系统结构图

Fig. 1 Structure of hybrid MTDC system

图 1 中, L_1 、 L_2 、 L_3 为各换流站电感, 取值为 0.05 H; R_1 、 R_2 、 R_3 为各直流线路电阻, 取值为 1Ω ; P_1 、 P_3 为换流站输出有功功率; P_{ac} 为交流线路传输的有功功率。

多端直流输电系统的控制可分为直流电压斜率控制和主从控制。采用直流电压斜率控制的换流站, 其端电压会随着功率的波动而波动, 同时换流站不

能精确控制有功功率的输出, 而且在系统潮流变化时, 各换流站会根据斜率系数进行功率调制, 若斜率系数设置不当, 则容易造成系统功率振荡。在尽量保持原有双端直流输电系统的输电结构和控制模式不变的基础上, 本文采用主从控制, 即其中一个换流站采用定直流电压控制, 作为主控制器; 其他换流站采用定有功功率控制, 作为从控制器, 如图 2 所示。

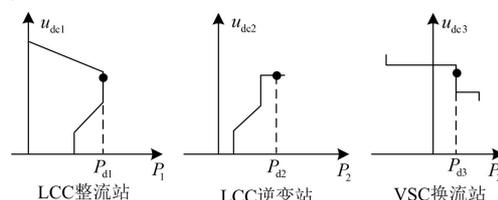


图 2 换流站工作模式

Fig. 2 Working mode of converter

图 2 中, LCC 整流站由最小触发角控制、定功率控制、低压限流控制共同构成, 稳态时工作在定功率控制; LCC 逆变站由定直流电压控制, 定功率控制、低压限流控制共同构成, 稳态时工作在定直流电压控制; VSC 换流站采用直流电压偏差控制, 正常运行时工作在定功率控制, 当 LCC 逆变站暂时闭锁或交流系统短暂故障导致直流电压上升或下降至一定值时, VSC 换流站自动切换为定直流电压控制, 接管主控制器功能, 成为系统功率平衡站。

2 基本原理

2.1 TLS-ESPRIT 辨识原理

TLS-ESPRIT 算法是一种基于信号子空间的高分辨率信号估计方法, 其核心思想是通过采样数据构成的自相关矩阵和互相关矩阵计算出信号的旋转算子, 通过旋转算子求出信号的频率和衰减因子, 再结合 TLS 就可以求出信号的幅值和相位^[16]。

采样信号由 m 个复正弦分量与白噪声之和构成, 其表达式为

$$x(n) = \sum_{k=1}^m c_k e^{(-\sigma_k + j\omega_k)nT_s} + \omega(n) \quad (1)$$

式中: $c_k = a_k e^{j\theta_k}$, a_k 、 θ_k 、 σ_k 、 ω_k 分别为第 k 个模态的幅值、相位、角频率和衰减因子; T_s 为采样周期; $\omega(n)$ 为白噪声; m 为信号中实正弦分量个数的 2 倍。

首先由采样数据构成 Hankle 数据矩阵 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X}_{L \times M} = \begin{bmatrix} x(0) & \cdots & x(M-1) \\ \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $L > m$, $M > m$, $L + M - 1 = N$ 。

通过数据矩阵 \mathbf{X} 计算其协方差矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$, 求解协方差矩阵的特征值及特征向量, 对特征值进行降序排列, 得到相应的特征向量 \mathbf{V} , 将其分解为信号子空间 \mathbf{V}_s 和噪声子空间 \mathbf{V}_n , 即 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_s | \mathbf{V}_n]$ 。

令 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 分别为 \mathbf{V}_s 去掉最后一行和去掉第一行得到的矩阵, 由 \mathbf{V}_1 和 \mathbf{V}_2 构成如下矩阵并进行特征值分解 $[\mathbf{V}_1 | \mathbf{V}_2] = \mathbf{Y}\mathbf{A}\mathbf{Z}^T$ 。

将 \mathbf{Z} 分解为 4 个 $m \times m$ 矩阵, 并计算 $\mathbf{Z}_{11}\mathbf{Z}_{21}^{-1}$ 的特征值 λ_k , 则可依据式(3)估计信号中各分量的频率、衰减因子和阻尼比。

$$\begin{aligned} \omega_k &= \frac{\arg \lambda_k}{T_s} \\ \sigma_k &= -\frac{\ln |\lambda_k|}{T_s} \\ \xi_k &= \frac{\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 射影控制原理

通常设计的控制器阶数较高时, 参考系统更多的特征根被保留下来, 就更能反映实际信息, 但同时控制器阶数过高又不利于工程实现。射影控制理论的主要思想是在保留参考系统主导特征根的基础上, 将状态反馈控制器映射为低阶输出反馈控制器^[7]。

假设被控系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (4)$$

其中: \mathbf{x} 、 \mathbf{y} 、 \mathbf{u} 分别为状态向量、输出向量、控制向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 分别为状态矩阵、控制矩阵、输出矩阵。

若系统状态反馈规律为 \mathbf{K} , 则控制向量可表示为

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{x} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)组成闭环系统, 对系统进行特征根分解得到

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X} = \mathbf{X}\mathbf{V} \quad (6)$$

式中: \mathbf{X} 为特征向量矩阵; \mathbf{V} 为特征根矩阵。

假设射影阻尼控制器具有状态方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_r\mathbf{z} + \mathbf{B}_r\mathbf{y} \\ \mathbf{u} = \mathbf{C}_r\mathbf{z} \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{z} 为控制器的状态向量; \mathbf{A}_r 、 \mathbf{B}_r 、 \mathbf{C}_r 分别为待求控制器的状态矩阵、控制矩阵和输出矩阵。

将射影阻尼控制器加入到被控系统中得到闭环反馈系统, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{A}_t\mathbf{x}_t \\ \mathbf{y}_t = \mathbf{C}_t\mathbf{x}_t \end{cases} \quad (8)$$

由式(4)和式(7)可推出系统状态矩阵 \mathbf{A}_t 为

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}\mathbf{C}_r \\ \mathbf{B}_r\mathbf{C} & \mathbf{A}_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

对状态矩阵特征值分解可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}\mathbf{C}_r \\ \mathbf{B}_r\mathbf{C} & \mathbf{A}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_u \\ \mathbf{W}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_u \\ \mathbf{W}_u \end{bmatrix} \mathbf{V}' \quad (10)$$

式中: \mathbf{X}_u 为式(4)和式(5)组成闭环系统所保留的主导特征值; \mathbf{V}' 为保留特征值所对应的特征向量; \mathbf{W}_u 为引入的特征向量。

由于 \mathbf{X}_u 是式(6)中保留的主导特征根, 故:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X}_u = \mathbf{X}_u\mathbf{V}' \quad (11)$$

由式(10)和式(11)联立可得:

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_u + \mathbf{B}\mathbf{C}_r\mathbf{W}_u = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X}_u \quad (12)$$

即

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{K}\mathbf{X}_u\mathbf{W}_u^{-1} \quad (13)$$

由式(10)知:

$$\mathbf{B}_r\mathbf{C}\mathbf{X}_u + \mathbf{A}_r\mathbf{W}_u = \mathbf{W}_u\mathbf{V}' \quad (14)$$

若定义 $\mathbf{P} = \mathbf{W}_u^{-1}\mathbf{B}_r$, 则有:

$$\mathbf{A}_r = (\mathbf{W}_u\mathbf{V}' - \mathbf{B}_r\mathbf{C}\mathbf{X}_u)\mathbf{W}_u^{-1} = \mathbf{W}_u(\mathbf{V}' - \mathbf{P}\mathbf{C}\mathbf{X}_u)\mathbf{W}_u^{-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{W}_u\mathbf{P} \quad (16)$$

由于 \mathbf{W}_u 为引入的特征向量矩阵, 可以为任何矩阵, 为简单起见, 令 \mathbf{W}_u 为单位矩阵。而状态反馈增益矩阵 \mathbf{K} 可由传统极点配置方法直接求出。

3 仿真分析

为验证上述控制方法, 本文用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建混合三端直流输电系统, 系统结构图如图 1 所示。其中交流系统参数主要取自文献[18], 四机均带有调速器、励磁器和 PSS, 系统中所增加的 VSC 换流站采用 dq 解耦控制方式, 换流站所连接的交流系统 3 用等效电源代替。

3.1 阻尼控制器设计

本文提出基于射影控制原理的混合直流附加阻尼控制器, 具体设计方法如下:

(1) 选取能够反映系统运行变化的变量作为系统反馈信号, 本文选取与直流输电并联运行的交流线路有功功率为控制器输入。

(2) 以 LCC 整流站的电流指令端为输入端, 交流联络线的有功功率信号为输出端。在仿真模型中, 对输入端加入 0.02 倍阶跃信号和不加任何信号分别进行仿真, 在输出端得到两组输出数据, 将两组数

据相减得到原始数据, 对原始数据采样, 构造 Hankle 矩阵, 并利用上述 TSL-ESPRIT 原理计算出系统各振荡模式的频率、衰减因子和阻尼比, 并以此构造被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{-0.2904s^3 - 0.01977s^2 - 15.48s - 5.485}{s^3 + 0.8878s^2 + 21.54s + 7.872}$$

(3) 求取状态反馈增益矩阵 K 。根据被控对象的传递函数求出系统主导极点为 $-0.26 \pm 4.61i$, 保证该模式振荡频率不变, 即把主导极点向左平移, 设置期望阻尼比为 0.13, 据此计算出期望的主导极点为 $-0.65 \pm 4.61i$, 利用传统极点配置方法求出系统的状态反馈矩阵为

$$K = [1.3317 \quad 1.3584 \quad 12.1336]$$

(4) 利用上述射影控制原理, 将系统状态反馈映射为输出反馈, 最终得到 2 阶的射影阻尼控制器:

$$K_s = \frac{-1.472s - 2.167}{s^2 + 2.578s + 5.218}$$

将射影阻尼控制器装设于 LCC 整流站电流指令端, 其结构图如图 3 所示。输入信号为交流联络线有功功率, 输出信号为换流阀的触发延迟角, 为消除输入信号的直流分量影响, 增加相应的隔直环节, 时间常数设置为 3 s。

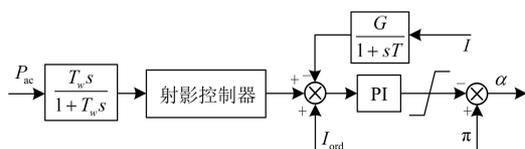


图 3 附加阻尼控制器结构图

Fig. 3 Structure of additional damping controller

3.2 结果验证

为验证射影阻尼控制器的效果, 本文利用 LMI 理论设计 H_2 / H_∞ 阻尼控制器作为参考。该方法不同于传统极点配置方法, 采用区域极点配置, 将系统主导极点配置到规定区域, 既保证系统具有一定的阻尼比, 同时为控制器的鲁棒性提供依据, 因为这样设计出的控制器实质上是一组极点不同的控制器, 能够允许被控模型在一定范围内波动。利用 H_∞ 范数评估系统鲁棒性能, 通过 H_2 范数衡量控制输出代价, 综合考虑控制器的鲁棒性和控制代价, 构建极小化目标函数, 调节 H_2 性能和 H_∞ 性能权重系数, 最终得到 4 阶 H_2 / H_∞ 阻尼控制器为

$$K_h = \frac{0.3116s^3 - 2.728s^2 - 38.15s - 13.54}{s^4 + 13.81s^3 + 67.68s^2 + 309.4s + 102.6}$$

分别对无附加控制、加入 H_2 / H_∞ 阻尼控制器和加入射影阻尼控制器后的系统进行辨识, 区域间

低频振荡模式对应的频率 f 和阻尼比 ξ 如表 1 所示。

表 1 测试系统振荡模式

Table 1 Oscillation mode of testing system

	主导极点	频率 f / Hz	阻尼比 ξ / %
附加控制	$-0.26 \pm 4.61i$	0.736	0.056 2
H_2 / H_∞ 控制	$-0.642 \pm 4.55i$	0.732	0.14
射影控制	$-0.644 \pm 4.66i$	0.748	0.137

由表 1 可知, 加入两种控制器后对原系统弱阻尼情况均有较大改善。为更加直观地比较两种控制器, 验证所设计的射影阻尼控制器的动态性能, 分别将两种控制器加入到混合直流输电系统中构成测试系统。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中对测试系统分别进行稳态仿真和故障仿真。

系统稳态仿真如下: 待系统稳定运行至 10 s 时, 将 LCC 整流站的电流整定值由 1 p.u. 增加至 1.05 p.u.。图 4 为系统稳态运行时, 直流线路出现小干扰扰动情况下, 交流联络线有功功率和两区域发电机转子角速度差的输出响应曲线。

由图 4 可知, 直流线路输送功率增加 0.05 p.u., 交流联络线输送功率减小, 并引发功率小幅度波动。因该扰动为小扰动, 系统模型几乎未发生变化, 且设计出两种控制器的阻尼比相近, 故两种控制器对扰动抑制效果也较为相近。

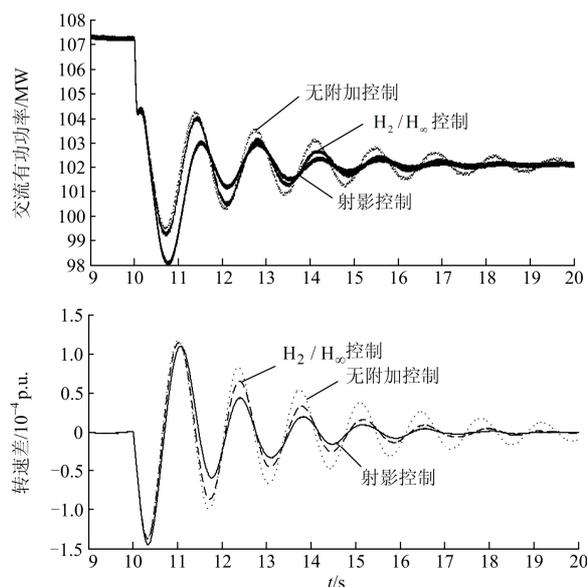


图 4 系统稳态仿真曲线

Fig. 4 Curve of system steady simulation

系统故障仿真如下: 待系统稳定运行至 10 s 时, 使系统在交流联络线 3 处和交流母线 1 处分别发生接地电抗为 0.05 p.u., 持续时间为 0.05 s 的三相非

金属接地故障。图 5 为在不同故障情况下，交流联络线有功功率和两区域发电机转子角速度差的输出响应曲线。

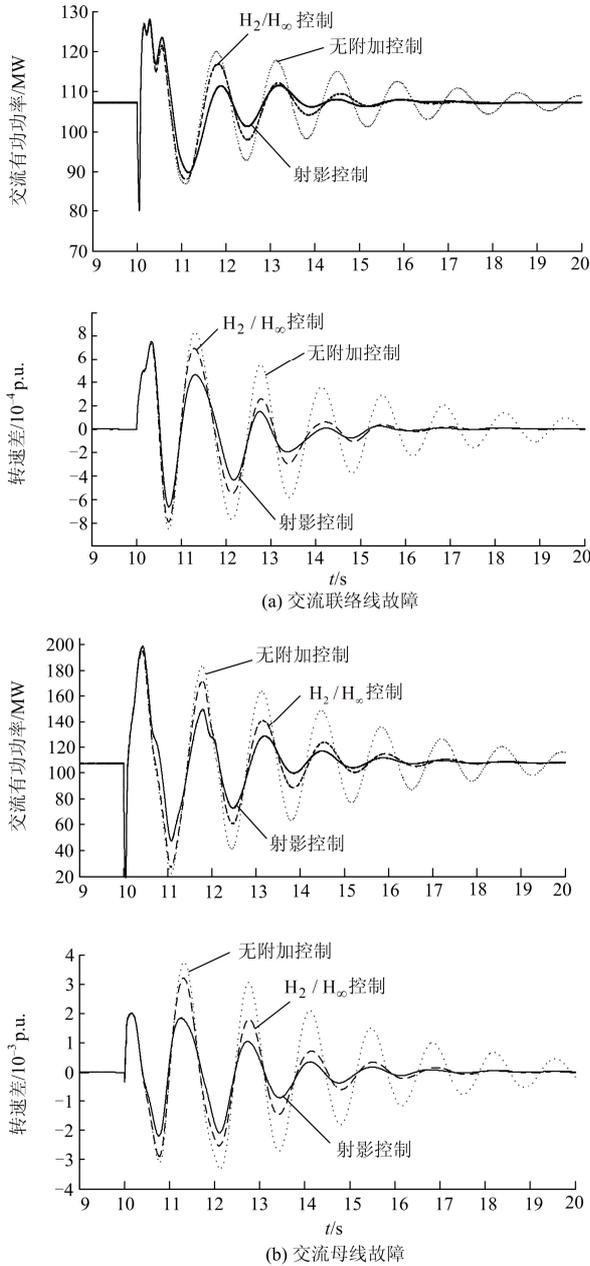


图 5 系统故障仿真曲线

Fig. 5 Curve of system fault simulation

由图 5 可知，当系统在交流联络线 3 处发生故障时，系统模型与辨识模型相比已发生较大变化，此时射影控制器效果略微优于 H_2 / H_∞ 阻尼控制器；当系统在交流母线 1 处发生故障时，系统模型发生更大变化，而低阶射影控制器效果却更加优于 H_2 / H_∞ 阻尼控制器，体现出更好的鲁棒性。

4 结论

搭建混合三端直流输电模型，在尽量保持原有双端直流输电系统控制模式不变的基础上采用主从控制策略，所增加的 VSC 换流站稳态运行时工作于定有功功率控制。

利用 TLS-ESPRIT 技术对搭建的系统模型进行辨识，基于射影控制原理设计直流附加阻尼控制器，并基于 LMI 理论设计 H_2 / H_∞ 阻尼控制器作为参考，在 PSCAD/EMTDC 软件中对测试系统进行仿真，最后由仿真结果对比表明：射影控制器直接利用保留的主导特征值，从而降低了控制器的阶数，与高阶 H_2 / H_∞ 阻尼控制器相比，不但更加利于工程实践，而且具有更好的鲁棒性和控制效果。

参考文献

[1] 严干贵, 孙兆键, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 140-141.
 YAN Gangui, SUN Zhaojian, MU Gang, et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 140-141.

[2] 董博, 许晓艳, 马烁, 等. 基于长过程动态仿真的风电接入对系统频率控制影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 57-59.
 DONG Bo, XU Xiaoyan, MA Shuo, et al. Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 57-59.

[3] 米增强, 刘力卿, 于洋, 等. 限电弃风工况下双馈风电机组有功及调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 81-82.
 MI Zengqiang, LIU Liqing, YU Yang, et al. The control strategy of active power and frequency regulation of DFIG under wind abandon condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 81-82.

[4] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-151.
 JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-151.

[5] 孙晓云, 同向前, 高鑫. 柔性直流输电系统中 IGBT 阀的故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 235-236.

- SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, GAO Xin. Research on the fault diagnosis of IGBT valve in VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 235-236.
- [6] 宋文峰, 孙栩, 王晶芳, 等. 大容量柔性直流接入大连电网稳定性分析计算[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 146-147.
- SONG Wenfeng, SUN Xu, WANG Jingfang, et al. Stability analysis research on Dalian grid connected by the high capacity flexible HVDC[J]. High voltage Apparatus, 2015, 51(11): 146-147.
- [7] 王振浩, 李洋, 高凯, 等. 引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 34-35.
- WANG Zhenhao, LI Yang, GAO Kai, et al. Study of using fault recovery signal for additional damping controller of VSC-based HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 34-35.
- [8] ZHAO Z, IRAVANI M R. Application of GTO voltage source inverter in a hybrid HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 369-377.
- [9] 郭春义, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 混合双极高压直流输电系统的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 98-102.
- GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, XIAO Xiangning, et al. Investigation of hybrid bipolar HVDC system performances [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 98-102.
- [10] 余瑜, 刘开培, 陈灏泽, 等. 伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统启动方法[J]. 高电压技术, 2014, 30(8): 2572-2576.
- YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Haoze, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 30(8): 2572-2576.
- [11] 李广凯, 李庚银, 梁海峰, 等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 82-86.
- LI Guangkai, LI Gengyin, LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 82-86.
- [12] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 基于 CSC 和 VSC 的混合多端直流输电系统及其仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 32-36.
- YUAN Xufeng, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Simulation study for a hybrid multi-terminal HVDC system based on VSC and CSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 32-36.
- [13] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-60.
- WEN Jinyu, CHEN Xia, YAO Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-60.
- [14] ZHENG Hanchu, CHEN Shousun, NI Yixin, et al. A study of multi-terminal DC modulation control[C] // IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, 1991: 615-620.
- [15] LEE R L, ZOLLMAN D, TANG J F, et al. Enhancement of AC/DC system performance by modulation of a proposed multiterminal DC system in the southwestern U.S.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 307-316.
- [16] 王曦, 李兴源, 王渝红, 等. 基于 TLS-ESPRIT 辨识的多直流控制敏感点研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 121-125.
- WANG Xi, LI Xingyuan, WANG Yuhong, et al. Analysis on controllability sensitive points of multi-HVDC systems based on TLS-ESPRIT method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 121-125.
- [17] 李宽, 李兴源, 李保宏, 等. 基于射影定理分层控制的次同步阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 80-83.
- LI Kuan, LI Xingyuan, LI Baohong, et al. Design of supplementary subsynchronous damping controller based on projective theorem for hierarchical control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 80-83.
- [18] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-06-29

作者简介:

张立奎(1989-), 男, 硕士, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制; E-mail: 1059598379@qq.com

张英敏(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制。

(编辑 葛艳娜)