

DOI: 10.7667/PSPC150690

多通道高压直流广域改进射影控制器设计

郭磊, 张英敏, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了对交直流互联系统含有的低频振荡和次同步振荡同时进行抑制, 给出了一种改进的射影控制方法。通过总体最小二乘-旋转不变算法辨识出交直流输电系统送端孤岛运行方式下的振荡模态和降阶后的模型, 运用带通滤波器将不同振荡频率的模态分解为多个通道, 根据射影控制理论并做出改进, 设计出多通道直流附加阻尼控制器。该控制器能够降低各种振荡模式间的相互影响, 兼顾了控制器的阶数和鲁棒性。考虑到广域信号采集和传输过程中存在时滞问题, 根据辨识结果并设计出了系统的相位补偿器。利用该方法对 PSCAD/EMTDC 中的某直流孤岛运行下的模型进行建模仿真, 并与无附加阻尼控制下的系统进行比较分析。结果表明多通道射影控制器可以同时抑制低频振荡和次同步振荡, 具有较好的鲁棒性; 同时设计出的相位补偿器可以有效地解决系统的时滞问题。

关键词: 低频振荡; 次同步振荡; 多通道; 改进射影控制; 相位补偿; 鲁棒性

Design of multi-channel wide area modified projective controller for HVDC transmission system

GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan

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

Abstract: To suppress the low frequency oscillation and sub-synchronous oscillation in the interconnected system at the same time, a kind of modified projective control method is given. Oscillation modals and the reduced-order controller of the AC/DC transmission system operating in island mode are identified by total least squares-estimation on signal parameters via rotational invariance techniques. Taking advantage of the band-pass filters to decompose the different oscillation frequencies into different channels, then according to the modified projective control theory, multi-channel projective controllers are designed. The controllers can reduce the mutual influence among the different oscillation models, also, the order and robustness of controllers are taken into consideration. Considering the time delay problems when the wide area signals are in the course of gathering and transferring, which can cause the control results worse, the phase compensation controllers are designed based on the identification results of the system. Taking advantage of this method to carry on the modelling and simulation in one DC model under the island operating, then comparison and analyses are done with the system without supplementary damping controller. The results validate that the multi-channel projective controller can suppress the low frequency and sub-synchronous oscillation at the same time, also, good robustness is verified; the phase compensation controllers designed can solve the time delay problems effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037003).

Key words: low frequency oscillation; sub-synchronous oscillation; multi-channel; modified projective controller; phase compensation; robustness

0 引言

随着电力系统电压等级的提高和电网建设规模的扩大, 我国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网、西南电网和南方电网 7 个跨省的大型区域电网和电网间的互联, 交直

流并存已经成为电网发展的必然趋势^[1]。目前向家坝-上海±800 kV、锦屏-苏州南±800 kV、溪洛渡-浙江金华±800 kV 特高压直流输电工程的直流送端均位于四川电网, 形成了电力系统送端多直流落点的局面, 极有可能形成孤岛运行^[2], 四川电网面临次同步振荡和弱阻尼的低频振荡问题的风险也逐渐增加, 所以对低频振荡和次同步振荡同时抑制的研究显得尤为重要。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51037003)

现有的研究主要集中在对电网低频振荡和次同步振荡的分别研究。文献[3]提出一种 HVDC 广域鲁棒控制器(WARC)设计方法提高区域间低频振荡的阻尼,但控制效果不太理想。文献[4]根据时域仿真的测试信号法得到不同工况下发电机电磁转矩对调制功率的相位滞后特性,采用多通道变参数的方法对次同步振荡进行抑制。文献[5]利用射影控制理论设计高压直流附加阻尼控制器对区域间低频振荡进行抑制。但高压直流输电系统在一些条件下的直流调制不仅容易产生次同步振荡,也容易产生伴随的低频振荡,但目前对次同步振荡和低频振荡同时抑制的研究还较少。文献[6]采用根轨迹法设计多通道直流附加阻尼控制器,降低振荡模式间的相互影响,同时抑制了低频振荡和次同步振荡,但该方法的控制比例增益较难确定。文献[7]基于线性矩阵不等式的鲁棒控制设计方法,设计出针对不同振荡模式的多通道附加高压直流控制器,设计出的鲁棒控制器阶数较高,会影响控制器的实用性和有效性。文献[8]提出一种自适应控制算法用于设计高压直流输电系统的多通道阻尼控制器,实现了低频振荡和次同步振荡的同时抑制。但自适应算法中的绝对稳定性理论对非线性部分满足的条件有较强的限制,且其只适用于单变量系统,使之适用范围的限制性较大。而多通道改进射影控制器有控制器阶数低、鲁棒性好、能够对低频振荡和次同步振荡同时抑制、约束条件少等优点,解决了这些问题。

本文基于总体最小二乘-旋转不变算法(TLS-ESPRIT)辨识出交直流输电系统低频振荡和次同步振荡的模式和降阶后的模型,将不同振荡频率的模式分解为多个通道,对不同的振荡模式分别设计出各通道的低阶射影控制器,降低了控制器间的相互影响。考虑到广域信号采集和传输过程中存在时滞问题,根据辨识结果设计出系统的相位补偿器。在 PSCAD/EMTDC 中对某直流送端孤岛运行下的模型进行仿真验证,并与无附加阻尼控制器下的系统进行仿真比较,结果表明设计出的多通道射影控制器可以有效地对低频振荡和次同步振荡进行抑制。多通道射影控制器阶数低、鲁棒性好,可以同时抑制对低频振荡和次同步振荡进行抑制,具有一定的工程借鉴价值。

1 射影控制理论

不考虑时滞影响的情况下,电力系统可建模为高阶的微分代数方程组,消去其中的代数变量,将系统建模为全阶的微分方程,其在一定工况下可建立系统的状态空间表达式为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为状态向量; \mathbf{u} 为控制向量; \mathbf{y} 为输出向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 分别为状态系数矩阵、控制系数矩阵和输出系数矩阵。

假设系统是状态完全可控的,所期望的闭环极点为: $s=\mu_1, s=\mu_2, \dots, s=\mu_n$, 利用状态反馈法寻求状态反馈增益矩阵 \mathbf{K} 使控制向量满足:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得,

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases}$$

定义 $\mathbf{A}' = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, 则期望的特征方程为

$$\begin{aligned} |s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})| = \\ (s - \mu_1)(s - \mu_2) \cdots (s - \mu_n) = \\ s^n + a_1s^{n-1} + \cdots + a_{n-1}s + a_n = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, a_1, \dots, a_{n-1}, a_n 为相关项的系数。

由凯莱-哈密尔顿定理得 \mathbf{A}' 应满足其自身的特征方程,即

$$\varphi(\mathbf{A}') = \mathbf{A}'^n + a_1\mathbf{A}'^{n-1} + \cdots + a_{n-1}\mathbf{A}' + a_n\mathbf{I} = 0$$

根据 Ackermann 公式^[9]得所需的全状态反馈控制矩阵 \mathbf{K} 为

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1] [\mathbf{B} \ \mathbf{A}\mathbf{B} \ \cdots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}]^{-1} \varphi(\mathbf{A})$$

射影控制理论可用于高压直流输电的附加阻尼控制,其主要思想是在保留参考全状态反馈系统主导特征值的前提下,将控制器映射为低阶静态或动态的输出反馈控制器^[10]。

若 $(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})$ 为非奇异矩阵,则对式(1)中闭环反馈系统的系统矩阵进行特征值分解得,

$$(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X} = \mathbf{X}\mathbf{A} \quad (4)$$

式(4)中, \mathbf{A} 为由特征值构成的 $n \times n$ 对角阵; \mathbf{X} 为 $n \times n$ 特征值向量矩阵。

假设待求的射影控制器具有状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}_d\mathbf{z} + \mathbf{D}_d\mathbf{y} \\ \mathbf{u} = \mathbf{N}_d\mathbf{z} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, \mathbf{H}_d 、 \mathbf{D}_d 和 \mathbf{N}_d 分别为待求射影控制器的状态系数矩阵、控制系数矩阵和输出系数矩阵, \mathbf{z} 为待求射影控制器的状态向量。

设式(1)基于射影控制的闭环反馈系统方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_e\mathbf{x}_e \\ \mathbf{y}_e = \mathbf{C}_e\mathbf{x}_e \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 $\mathbf{x}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix}$, $\mathbf{y}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{u} \end{pmatrix}$ 。则

$$\dot{x}_e = \begin{pmatrix} A & BN_d \\ D_d C & H_d \end{pmatrix} x_e \quad (7)$$

对系统矩阵 A_e 进行特征值分解得,

$$\begin{pmatrix} A & BN_d \\ D_d C & H_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p & X_r \\ W_p & W_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_p & X_r \\ W_p & W_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_p & 0 \\ 0 & A_r \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\text{即 } D_d C X_p + H_d W_p = W_p A_p$$

$$H_d = W_p (A_p - W_p^{-1} D_d C X_p) W_p^{-1}$$

令 $P = W_p^{-1} D_d$, 则

$$H_d = W_p (A_p - P C X_p) W_p^{-1}$$

$$D_d = W_p P$$

由式(8)得

$$A X_p + B N_d W_p = X_p A_p$$

由式(4)得

$$(A - B K) X_p = X_p A_p$$

故

$$A X_p + B N_d W_p = (A - B K) X_p$$

$$N_d = -K X_p W_p^{-1}$$

当 W_p 为单位矩阵时,

$$\begin{cases} N_d = -K X_p \\ H_d = A_p - P C X_p \\ D_d = P \end{cases} \quad (9)$$

令 $Q = \begin{pmatrix} X_p & E_n \\ E_p & 0 \end{pmatrix}$, E_n 、 E_p 分别为 n 、 p 阶单位

矩阵。则

$$Q^{-1} A_e Q = \begin{pmatrix} 0 & E_p \\ E_n & -X_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & B N_d \\ D_d C & H_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p & E_n \\ E_p & 0 \end{pmatrix} = \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} D_d C + H_d & D_d C \\ (A - X_p D_d C) X_p + B N_d - X_p H_d & A - X_p D_d C \end{pmatrix}$$

$$(A - X_p D_d C) X_p + B N_d - X_p H_d =$$

$$A X_p + B N_d - X_p (D_d C X_p + H_d) =$$

$$A X_p + B N_d - X_p A_p = 0$$

令 $A_r = A - X_p D_d C$, 则

$$Q^{-1} A_e Q = \begin{pmatrix} A_p & B C \\ 0 & A_r \end{pmatrix}$$

可知, 射影控制器虽保留了控制系统的主导特征值 λ_p , 但也引入了其他的特征值, 引入的特征值由特征向量 A_r 决定^[11]。

即闭环系统的特征值 λ_s 可表示为

$$\lambda_s = \lambda_p \cup \lambda(A_r) \quad (11)$$

由式(9)、式(10)知, 可通过调节 P 控制矩阵 A_r

特征值阻尼比的调节范围, 降低其对系统振荡模式的影响。

2 多通道射影控制器设计

2.1 基于 TLS-ESPRIT 算法的系统模态辨识

TLS-ESPRIT 算法是振荡衰减正弦信号参数估计和谐波恢复的重要工具, 在电力系统的暂态信号分解、谐波和间谐波高精度检测等场合得到广泛应用。和 prony 算法相比, TLS-ESPRIT 算法具有更强的抗噪、抗干扰能力^[12]。

在搭建电磁暂态模型时, 主要考虑某直流系统 500 kV 线路, 对 220 kV 的线路和负荷进行等值处理, 得到的某直流孤岛运行系统的拓扑结构如图 1 所示。

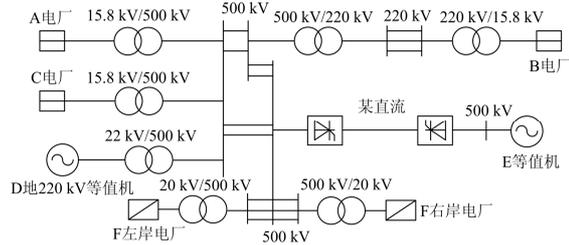


图 1 某直流孤岛运行系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of one DC system operating in island mode

孤岛运行时直流降功率至 25%(1600 MW) 单极运行, A 电厂和 B 电厂各开 2 台发电机, C 电厂开一台发电机, F 左岸水电厂和 F 右岸水电厂各开 4 台发电机。

利用机组作用系数法(UIF)对该直流孤岛运行下电网的风险性进行评估, 所得各电厂机组出力 and 机组作用系数结果如表 1。

表 1 各电厂机组出力及作用系数

Table 1 UIF and output of each generator

电厂名称	电厂出力	机组作用系数(UIF)
A 电厂	2×600	0.106
C 电厂(500 kV)	1×600	0.107
C 电厂(220 kV)	1×600	0.072
B 电厂	2×600	0.066

由表 1 可知, 该直流孤岛运行情况下, A 电厂、C 电厂 500 kV 侧相关机组的机组作用系数都已超过 0.1, 可见相关电厂和直流的关系比较紧密, 引发次同步振荡风险较大。

利用 TLS-ESPRIT 算法对系统 A 电厂和 C 电厂的低频振荡和次同步振荡模态进行辨识, 结果如表 2 和表 3。

由表 2、表 3 可知, 在该直流孤岛运行情况下, A 电厂和 C 电厂 500 kV 侧中都存在低频振荡(LFO)和次同步振荡(SSO)。13.8 Hz 和 25.0 Hz 的为次同步

振荡模式，0.74 Hz 的为低频振荡模式。次同步振荡 SSO1 和 SSO2 的阻尼比接近 0，低频振荡 LFO 的阻尼比也较小，属于弱阻尼振荡模式。

表 2 A 电厂振荡模态结果

Table 2 Oscillation modals results of A electric power plant

振荡模态	振荡频率	特征值	阻尼比/%
LFO	0.740 4	-0.229±4.65i	4.930
SSO1	13.821 6	-0.105±86.80i	0.120
SSO2	25.011 8	-0.091±157i	0.058

低频振荡模式传递函数为：

$$G_{LFO}(s) = \frac{0.05336s^6 - 0.2363s^5 - 4.293s^4 + 104.6s^3 - 183.2s^2 + 222.8s}{s^6 + 3.358s^5 + 66.79s^4 + 137.1s^3 + 1340s^2 + 1340s + 7949}$$

次同步振荡模式传递函数为：

$$G_{SSO1}(s) = \frac{0.02751s^6 - 4.738s^5 + 402.6s^4 - 6.36 \times 10^4 s^3 + 1.568 \times 10^6 s^2 - 2.289 \times 10^8 s}{s^6 + 8.102s^5 + 2.117 \times 10^4 s^4 + 1.142 \times 10^5 s^3 + 1.489 \times 10^8 s^2 + 4.005 \times 10^8 s + 3.478 \times 10^{11}}$$

$$G_{SSO2}(s) = \frac{0.06997s^6 - 26.71s^5 + 3654s^4 - 1.246 \times 10^6 s^3 + 4.752 \times 10^7 s^2 - 1.45 \times 10^{10} s}{s^6 + 2.589s^5 + 7.182 \times 10^4 s^4 + 1.268 \times 10^5 s^3 + 1.718 \times 10^9 s^2 + 1.552 \times 10^9 s + 1.369 \times 10^{13}}$$

2.2 改进射影控制器设计

通常情况下可通过附加阻尼控制器对交直流互联系统的低频振荡或次同步振荡模式提供阻尼，但附加的阻尼控制器可能会激发新的振荡模式或会对其它振荡模式提供负阻尼，故文中通过添加相应频次的带通滤波器将不同的振荡模式分解到不同的通道，分别设计出各自通道的改进射影控制器，减少各种振荡模式间的相互影响，从而实现对低频振荡和次同步振荡的同时抑制。设计出的多通道射影控制器结构图如图 2 所示。

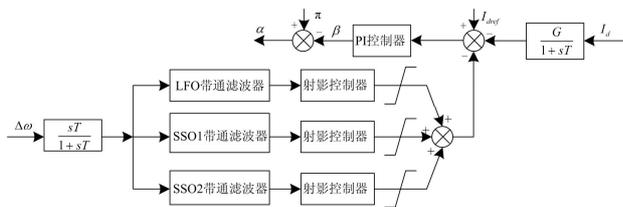


图 2 多通道射影控制器结构图

Fig. 2 Control diagram of multi-channel projective controller
改进射影控制器设计步骤：

- 1) 利用 TLS-ESPRIT 算法辨识出的系统的各种振荡模态和传递函数。
- 2) 采用状态反馈的极点配置原理得到系统的状态反馈矩阵 K 。
- 3) 根据改进射影控制理论，通过 $[V, D]=eig(A-BK)$ 得闭环系统的特征值，从 V 和 D 中分别选取需要保留的 r 阶主导特征向量矩阵 X_p 和特征值矩阵 A_p 。
- 4) 设置 A_p 矩阵的特征值阻尼比大于 15%，进而

表 3 C 电厂振荡模态结果

Table 3 Oscillation modals of C electric power plant

振荡模态	振荡频率	特征值	阻尼比/%
LFO	0.738 9	-0.241±4.61i	5.200
SSO1	13.789 8	-0.043±86.6i	0.049
SSO2	25.000 0	-0.079±157i	0.050

利用带通滤波器将不同的振荡模态分解到多个通道，分别对 3 种振荡模式的模型进行辨识，得到 3 种振荡模式下系统的传递函数。

选取合适的矩阵 P ，对于干扰矩阵 $A_p = A - X_p D_d C$ 特征值进行限定，减少干扰矩阵对系统振荡模态影响。

$$\begin{aligned} 5) \text{ 最后通过 } & H_d = A_p - PCX_p; \\ & D_d = P; \\ & N_d = -KX_p; \\ & M_d = 0; \end{aligned}$$

$$[\text{num}, \text{den}] = \text{ss2tf}(H_d, D_d, N_d, M_d);$$

$$Pj\text{-controller} = \text{tf}(\text{num}, \text{den})$$

将改进射影控制理论中的状态空间表示形式转化为传递函数形式，得到 3 种振荡下系统的控制器。低频振荡模式下的射影控制器：

$$K_{LFO}(s) = \frac{-3.997 \times 10^6 s - 5.426 \times 10^6}{s^2 + 7.406 \times 10^4 s + 1.005 \times 10^4}$$

次同步振荡模式下的射影控制器：

$$K_{SSO1}(s) = \frac{-8.522 \times 10^6 s - 1.331 \times 10^6}{s^2 + 6.564 \times 10^4 s + 1.018 \times 10^4}$$

$$K_{SSO2}(s) = \frac{-1.555 \times 10^6 s - 2.181 \times 10^6}{s^2 + 5.524 \times 10^4 s + 7.723 \times 10^3}$$

3 仿真分析

3.1 不同故障下控制器效果仿真验证

该直流孤岛运行下，不考虑广域信号时滞问题，验证不同故障下射影控制的控制效果。

(1) 2 s 时 C 电厂 500 kV 侧发生 0.05 s 三相接地短路故障，A 电厂 1 号机的转子角速度与额定转子角速度的差值仿真波形如图 3~图 6。

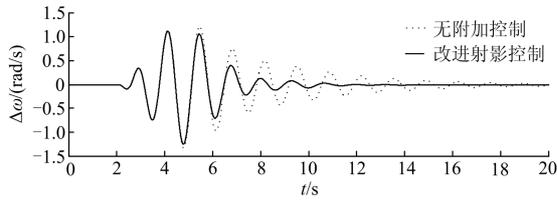


图 3 LFO 下转子角速度差
Fig. 3 Rotor velocity difference of LFO

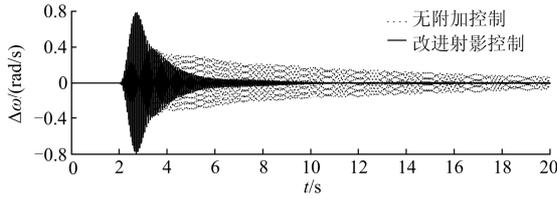


图 4 SSO1 下转子角速度差
Fig. 4 Rotor velocity difference of SSO1

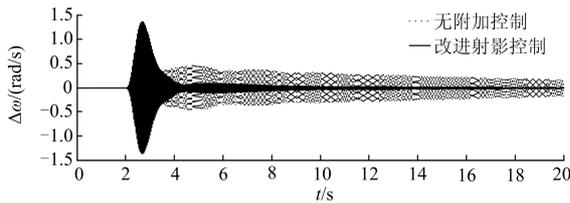


图 5 SSO2 下转子角速度差
Fig. 5 Rotor velocity difference of SSO2

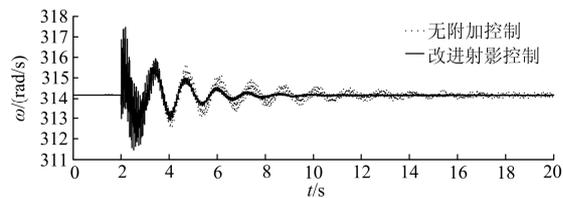


图 6 添加阻尼控制器前后转子角速度
Fig. 6 Rotor velocity difference before and after the damping controller added

(2) 2 s 时 B 电厂 1 号机 220 kV 侧发生 0.1 s 三相接地短路故障, A 电厂 1 号机转子角速度与额定转子角速度的差值仿真波形如图 7~图 10。

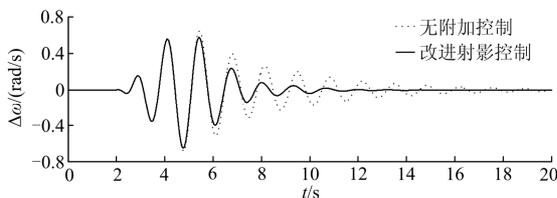


图 7 LFO 转子角速度差
Fig. 7 Rotor velocity difference of LFO

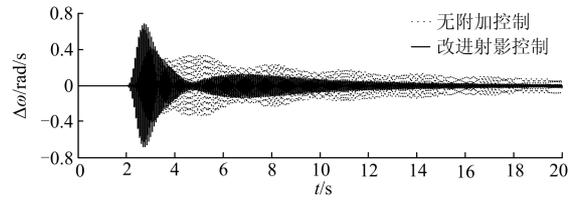


图 8 SSO1 下转子角速度差
Fig. 8 Rotor velocity difference of SSO1

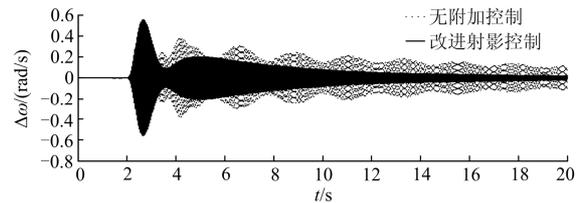


图 9 SSO2 下转子角速度差
Fig. 9 Rotor velocity difference of SSO2

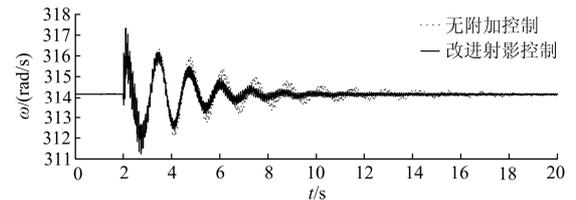


图 10 添加阻尼控制器前后转子角速度
Fig. 10 Rotor velocity difference before and after the damping controller added

由图 7~图 10 可以看出, 相比于无附加阻尼控制, 不同振荡模式在不同的故障条件、运行方式下所采用的射影控制器均能够有效地对低频振荡和次同步振荡进行抑制, 具有较好的鲁棒性。由图 7~图 10 知, 在 B 电厂 1 号机 220 kV 侧发生三相接地短路故障时, 系统产生了新的振荡模式, 但是射影控制器对这种振荡模式仍有较好的抑制效果。

3.2 考虑系统时滞控制器作用效果

考虑到附加阻尼控制所采用的信号为广域信号, 其在采集和传输过程中存在时滞问题, 有必要验证不同时间延迟下控制器的性能。延时环节采用二阶 Pade 逼近, 其表达式可近似表示为

$$e^{-s\tau} \approx \frac{\tau^2 s^2 - 6\tau s + 12}{\tau^2 s^2 + 6\tau s + 12}$$

孤岛运行下, B 电厂 1 号机 2 s 时发生 0.1 s 三相接地短路故障, LFO 下广域信号受 20 ms、50 ms、100 ms 时滞影响, 仿真波形如图 11; SSO1 下广域信号分别受 2 ms、4 ms、5 ms 时滞影响, 仿真波形如图 12; SSO2 下广域信号分别受 1 ms、2 ms、4 ms 时滞影响, 仿真波形如图 13 所示。

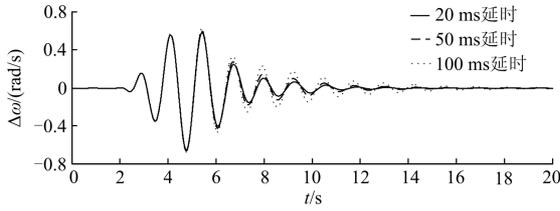


图 11 LFO 下延时
Fig. 11 Time delay of LFO

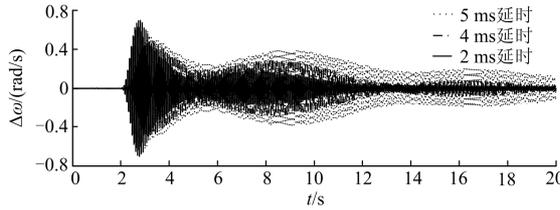


图 12 SSO1 下延时
Fig. 12 Time delay of SSO1

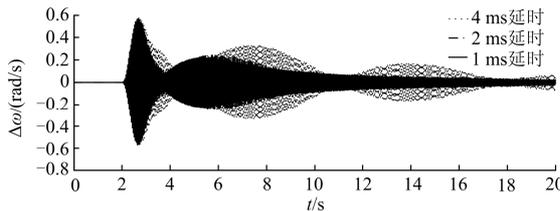


图 13 SSO2 下延时
Fig. 13 Time delay of SSO2

由图 11~图 13 知, 低频振荡模式受时滞影响较小, 控制器在 100 ms 延时仍有较好控制效果; 次同步振荡模式由于其振荡频率较高, 很小的时滞下也会产生较大的滞后相位, 受时滞影响较大。

实际系统中信号传输过程中必定存在时滞, 时滞会对闭环系统的区域间阻尼和系统辨识产生很大影响。鉴于次同步振荡模式对时间延迟较为敏感, 有必要对次同步振荡模式因时滞引起的控制器相位滞后进行相位补偿。补偿方法^[13-14]如下:

设相位补偿环节为 $H_c(s)$, 考虑时滞时系统的主导极点为 p_0 , 时滞环节为 $e^{-\tau s}$, 则需补偿的相位为 $H_c(s) = e^{p_0 \tau}$ 。设相位补偿环节为

$$H_c(s) = G \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}$$

若系统的主导极点为 $p_0 = \sigma_0 + j\omega_0$, 则

$$\begin{cases} a = \frac{1 - \sin \omega_0 \tau}{1 + \sin \omega_0 \tau} \\ T_1 = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{a}}, T_2 = a T_1 \\ G = 1/|H_c(j\omega_0)| \end{cases}$$

当 B 电厂 1 号机发生三相短路故障, 以 SSO1 在 4 ms 时滞和 SSO2 在 3 ms 时滞为例进行仿真分析, SSO1 和 SSO2 下相位补偿后的仿真如图 14~图 15。

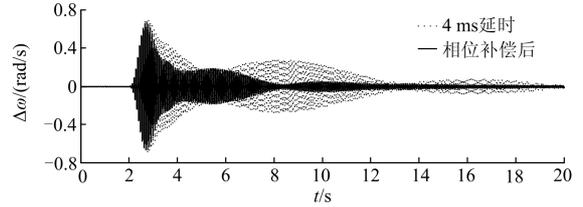


图 14 SSO1 相位补偿
Fig. 14 Phase compensation of SSO1

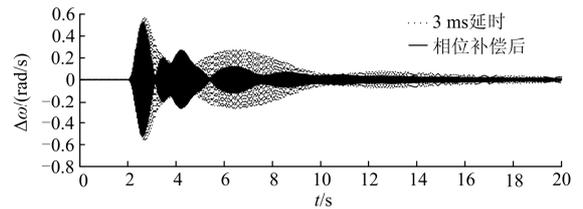


图 15 SSO2 相位补偿
Fig. 15 Phase compensation of SSO2

由图 14~图 15 可知, 相位补偿控制器可以有效地解决系统因次同步振荡引起的时滞问题, 具有较好的控制效果。添加时滞补偿环节可以保证区域间阻尼控制的有效性以及系统的稳定性, 防止因采用广域信号的时滞问题导致区域间阻尼控制的失效。

4 结论

本文采用 TLS-ESPRIT 算法辨识出系统的振荡模态和降阶后的模型, 将不同振荡频率的模态通过带通滤波器分解为多个通道, 根据射影控制理论并做出改进, 设计出各通道的低阶射影控制器。考虑到广域信号采集和传输过程中存在时滞问题, 根据辨识结果设计出系统的相位补偿器。利用该方法对 PSCAD/EMTDC 中的某直流孤岛运行下的模型进行建模仿真, 并与无附加阻尼控制下的系统进行比较分析。结果表明设计出的多通道射影控制器可以同时抑制低频振荡和次同步振荡, 具有较好的鲁棒性; 同时所设计出的相位补偿器可以有效地解决系统的时滞问题。多通道改进射影控制器阶数低、鲁棒性好, 具有一定的工程借鉴价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 郭春林, 高本锋, 等. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 1-28.
- [2] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振

- 荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.
- SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [3] 翁华, 徐政, 许烽, 等. 基于广域测量信息的HVDC鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 103-109.
- WENG Hua, XU Zheng, XU Feng, et al. Robust design of HVDC supplementary controllers based on WAMS signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 103-109.
- [4] 蒋平, 胡弢, 吴熙. VSC-HVDC 多通道附加阻尼控制抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 27-31.
- JIANG Ping, HU Tao, WU Xi. Multi-channel supplementary damping control in VSC-HVDC for SSO suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 27-31.
- [5] 李保宏, 张英敏, 李兴源, 等. 基于改进射影控制的降阶高压直流附加控制器设计[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 426-432.
- LI Baohong, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. High voltage direct current additional reduced-order controller design based on improved projective control[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(9): 426-432.
- [6] 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): 89-93.
- 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): 89-93.
- [7] 李保宏, 张英敏, 李兴源, 等. 多通道高压直流附加鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 858-864.
- LI Baohong, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Design of multi-channel additional robust controller for HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 858-864.
- [8] 曾果, 李兴源, 刘天琪, 等. 同时抑制低频振荡和次同步振荡的多通道广域自适应阻尼控制[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 424-432.
- ZENG Guo, LI Xingyuan, LIU Tianqi, et al. Multi-channel wide area adaptive damping control for suppressing low-frequency and sub-synchronous oscillation[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 424-432.
- [9] OGATA K. Modern control engineering[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2010: 612-620.
- [10] SRINIVASAN A, BATUR C, VEILLETTE R, et al. Project control design for multi-zone crystal growth furnace[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 1994, 2(2): 142-147.
- [11] MEDANIC J. Nonlinear output feedback control design by projective controls[C] // Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Design and Control, Maui, Hawaii USA, December, 2003.
- [12] 于兴林, 李慧敏, 李天云. 基于EEMD和TLS-ESPRIT的谐波间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 67-72.
- YU Xinglin, LI Huimin, LI Tianyun. A harmonic and inter-harmonic detection method based on EEMD and TLS-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 67-72.
- [13] 李岩, 胡志坚, 刘宇凯, 等. 基于多目标优化的时滞广域阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 94-101.
- LI Yan, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Design of multi-objective optimization based on time delay wide area damping controller[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 94-101.
- [14] 杨琳, 肖湘宁. 电力系统稳定器相位补偿方式对次同步振荡的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 1-7.
- YANG Lin, XIAO Xiangning. Impact of phase compensation methods of power system stabilizer on subsynchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 1-7.

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-08-21

作者简介:

郭磊(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制; E-mail: gleisky@163.com

张英敏(1974-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制; E-mail: zhangym_cd@163.com

李兴源(1945-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国电机工程学会电力系统专委会委员, IEEE高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电的研究。E-mail: x.y.li@163.com

(编辑 张爱琴)