基于射影定理分层控制的次同步阻尼控制器设计

李 宽,李兴源,李保宏,陈 实 (四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:火电机组经高压直流输电有可能引起轴系振荡,严重影响电力系统的稳定性,故为高压直流输电系统 设计次同步阻尼控制器尤为重要。从系统状态方程的角度出发,基于系统状态方程,通过滤波器提取轴系各 固有扭振模态,进而提出基于 TLS-ESPRIT 和射影定理设计直流附加次同步阻尼控制器,最终实现各个模态 的分层控制。射影控制可保留系统的主导特征根,能够在保留系统实际信息的同时降低控制器的阶数。以某 电网直流系统作为实例仿真模型,仿真结果表明,基于 TLS-ESPRIT 和射影定理分层控制的阻尼控制器可有 效增大系统阻尼,实现次同步振荡的快速抑制,且控制器阶数较低,便于工程实现。

关键词:高压直流输电;次同步振荡;射影控制;附加次同步阻尼控制器;阻尼;分层控制;设计 中图分类号:TM 721.1 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.013

0 引言

高压直流输电 HVDC(High Voltage Direct Current)作为一种大电网互联的有效手段,在国内外都 得到了广泛发展^[1]。HVDC 可以解决大容量、高压 电、远距离输电问题,有效减小了电能损耗。但直流 输电整流站定电流控制的等间隔脉冲触发方式有 可能对邻近大型火电机组引入负阻尼,进而有可能 引起发电机轴系的次同步振荡 SSO(SubSynchronous Oscillation)现象,从而对发电机组以及电网的稳定 运行造成影响^[2-3]。

SSO 的发生有可能造成发电机组轴系断裂、电 网失稳等情况,因此对次同步阻尼控制器的研究有 重要意义。抑制 SSO 的手段有很多种,可通过附加 励磁系统阻尼控制 SEDC(Supplementary Excitation Damping Controller)^[4-5]、FACTS 装置^[6-9]等方法抑制, 此外,随着计算机计算能力的不断提高,也可以通 过一些智能算法设计阻尼控制器抑制 SSO,并取得了 不错的控制效果^[10-11]。当直流引起 SSO 时,附加次同 步阻尼控制器 SSDC(Supplementary SubSynchronous Damping Controller)^[12-13]作为一种经济有效的方法 而被广泛应用。文献[14]提出利用 Prony 辨识得到 系统的传递函数,然后进行设计 SSDC,但 Prony 存 在定阶困难的缺点,得到的系统传递函数阶数较高, 不利于实际工程实现。文献[15]提出利用系统传递 函数 Bode 图设计 SSDC,但未给出详细的控制结构。 文献[16]提出基于 TLS-ESPRIT 辨识出 SSO 的振荡 频率和阻尼信息,然后基于辨识结果得到振荡模态

的相位补偿量,设计出 SEDC。国内外大部分文献主 要是集中在基于数学算法、SSO 发生机理进行相位补 偿等方法设计 SSDC,从系统状态方程角度设计 SSDC 的研究较少。

根据发电机轴系刚体系数、轴系扭转系数及轴系 惯性时间常数等参数,可直接得到发电机轴系的固有 扭振频率(f_e)^[2]。本文从系统状态方程角度出发,提出 基于射影定理^[17]进行降阶处理来设计 SSDC。首先利 用 TLS-ESPRIT 算法^[16]得到每个 f_e下的系统线性模 型,然后通过射影定理保留闭环系统主导振荡模态, 将状态反馈转换为输出反馈,最后得到每个 f_e降阶处 理后的控制器传递函数,从而实现每个振荡模态分层 控制。

本文以某电网直流系统作为实例仿真模型,先 通过 TLS-ESPRIT 算法求得每个 f_e下的系统传递函 数,然后基于射影定理分别针对每个 f_e求得 SSDC 的 传递函数,最后将设计的 SSDC 加入到直流整流侧的 定电流控制器上。以 PSCAD/EMTDC 作为实例仿真 软件,仿真结果表明,设计的控制器可有效抑制直流 输电引起的 SSO。

1 基本原理

1.1 射影控制

射影控制是保留参考系统主导特征根的条件下, 将状态反馈控制器映射为低阶静态或动态的输出反 馈控制器。当设计的射影控制器的阶数多时,更多的 参考系统特征根将被保留下来,更能反映参考系统的 实际信息,这使得射影控制器的设计更为灵活,但控 制器阶数过高不利于实际工程实现。

在 SSDC 的设计过程中,由于发电机组轴系的固 有扭振频率可以通过计算得到,故而基于射影控制设 计的控制器直接保留固有模态下的特征根即可,即 针对振荡模态的阻尼比为负或较小的特征根设计控

收稿日期:2014-07-04;修回日期:2014-12-05

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51037003);国家 电网公司科技项目(522830140003)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51037003) and the Science and Technology Program of SGCC(522830140003)

制器。

被控系统的状态方程可用式(1)表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu\\ y = Cx \end{cases}$$
(1)

其中,x为状态向量;y为输出向量;u为控制向量;A 为状态矩阵;B为控制矩阵;C为输出矩阵。

系统状态反馈可表示为:

其中,**K**为状态反馈增益矩阵。加入状态反馈后可得闭环系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} \tag{3}$$

将式(3)表示的系统进行特征根分解得到:

$$(A - BK)X = X\Lambda \tag{4}$$

其中, *A* 为特征根三角阵; *X* 为特征向量构成的矩阵。 令基于射影定理得到的 SSDC 的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{z} = A_{u} z + B_{u} y \\ u = C_{u} z \end{cases}$$
(5)

其中,z为 SSDC 的状态向量; A_u 、 B_u 和 C_u 分别为 SSDC 的状态矩阵、控制矩阵和输出矩阵。

联立式(1)和(5)得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}\mathbf{C}_{\mathrm{u}} \\ \mathbf{B}_{\mathrm{u}}\mathbf{C} & \mathbf{A}_{\mathrm{u}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{\mathrm{u}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}$$
(6)

式(6)可表示为被控系统式(1)基于射影控制式 (5)得到的闭环反馈系统。式(6)可简化为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}' = \mathbf{A}'\mathbf{x}' \\ \mathbf{y}' = \mathbf{C}'\mathbf{x}' \end{cases}$$
(7)

对A'进行特征根分解得:

$$\begin{array}{c} A & BC_{u} \\ B_{u}C & A_{u} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} X' \\ W' \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} X' \\ W' \end{array} \right] A'$$
 (8)

其中,W'为引入的特征向量;A'为式(4)求得的主导 特征根保留值;X'为所保留主导特征根所对应的特 征向量。即存在:

$$(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{K})\boldsymbol{X}' = \boldsymbol{X}'\boldsymbol{\Lambda}' \tag{9}$$

式(8)中,由于引入状态反馈形成闭环系统导致 系统阶数增加。

由式(8)知:

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{u}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}' + \boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}\boldsymbol{W}' = \boldsymbol{W}'\boldsymbol{\Lambda}'$$
(10)
由式(10)可推得,

$$A_{u} = (W'A' - B_{u}CX')W'^{-1} = W'(A' - W'^{-1}B_{u}CX')W'^{-1}$$
(11)

定义
$$P = W'^{-1}B_u$$
,则有:

$$\boldsymbol{A}_{u} = \boldsymbol{W}^{\prime} \left(\boldsymbol{\Lambda}^{\prime} - \boldsymbol{P} \boldsymbol{C} \boldsymbol{X}^{\prime} \right) \boldsymbol{W}^{\prime - 1}$$
(12)

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{u}} = \boldsymbol{W}'\boldsymbol{P} \tag{13}$$

鉴于 Λ' 为式(4)求得的主导特征根保留值,则

由式(8)联立式(9)亦可推得:

$$\begin{cases} AX' + BC_{u}W' = X'A' \\ (A - BK)X' = X'A' \end{cases}$$
(14)

即可求得:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{u}} = -\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}'\boldsymbol{W}'^{-1} \tag{15}$$

由式(12)、(13)、(15)知,只要求得状态反馈增益矩阵 K,即可求得 SSDC 的状态矩阵、控制矩阵和输出矩阵,进而得到 SSDC 的传递函数。

由于 W' 表示引入的特征向量,可能为任何矩阵, 故而可直接取 W'为单位矩阵。但考虑引入的特征 向量后,系统的输出向量 y 除了包含参考系统的变量, 还包含加入反馈后增加的变量。由文献[17]知,矩 阵 P 为一个可调的自由参数对称矩阵,因而可以通过 矩阵 P 的选择降低引入特征向量对原系统的影响。

1.2 直接代入法求状态反馈增益

由于 SSDC 的设计是针对每个轴系固有扭振频率 分别设计相应的控制器实现分层控制,故而每个控 制器只针对 1 对或 2 对保留共轭特征根,因此可以用 直接代入法^[18]求得状态反馈增益矩阵 **K**。

假设控制器阶数为4阶,可将状态反馈增益矩阵 K写为:

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \end{bmatrix}$$
(16)

假设闭环系统式(3)所期望的特征根的位置分 别为 $s = \mu_1, s = \mu_2, s = \mu_3, s = \mu_4,$ 将**K**代入闭环系统式(3) 可得:

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}| = (s - \mu_1)(s - \mu_2)(s - \mu_3)(s - \mu_4) \quad (17)$$

由式(17)知该方程两端均为s的多项式,故而 可通过其两端的s同次幂系数相当来确定 k_1,k_2,k_3 和 k_4 ,进而可求得状态反馈增益矩阵 K_0 。

1.3 控制器设计

首先取得待研究发电机端转速,经过 4 阶巴特 沃斯滤波器得到相应的固有扭振频率,然后基于射 影控制设计 SSDC 的传递函数 G(s),最终将针对每 个振荡模态所设计的 SSDC 输出叠加后,加入到直 流整流侧的主控制器上,控制框图如图 1 所示。其 中,k 为附加控制器增益; $\Delta \omega$ 为发电机转速偏差;I和 I_{ad} 分别为直流电流的测量值和整定值; α 为整流 侧触发角。



Fig.1 Structure of SSDC

2 仿真算例

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建某电网直流 输电系统的拓扑结构图,此直流输电系统额定电流为 3 kA,双极运行额定传输功率为 3000 MW。当此系 统在孤岛情况下降压 70%运行时,系统发生扰动会 引发整流侧发电机组的 SSO。拓扑图如图 2 所示,其 中发电厂 A 机组轴系参数如下:高压缸(HP)、中压缸 (IP)、低压缸(LP)、发电机(GEN)的惯性常数分别为 0.2125、1.5965、1.7125、0.731;HP-IP、IP-LP、LP-GEN 的弹性系数分别为 12544、16500、22161,转矩力矩分 别为 0.53 p.u.、0.235 p.u.。



图 2 加西於近 Fig.2 Islanded system

经计算得知该发电机系统存在 13.38 Hz、24.44 Hz 和 29.97 Hz3 个振荡模态。在直流整流侧主控制器 上施加幅值为 10% 的阶跃,再分别通过 TLS-ESPRIT 算法辨识出这 3 个振荡模态频率作为控制器输入 时,所对应的系统传递函数为:

$$G_{\text{modl}} = \frac{0.007751s^4 + 9.286s^3 - 402.7s^2 + 6.776e^4s}{s^4 + 7.664s^3 + 1.379s^2 + 5.43e^4s + 4.75e^7} (18)$$

$$G_{\text{mod2}} = \frac{-0.05253s^4 + 13.24s^3 - 2041s^2 + 2.395e^5s}{s^4 + 6.051s^3 + 4.71e^4s^2 + 1.43e^5s + 5.54e^8}$$
(19)

$$G_{\text{mod3}} = \frac{0.0746s^4 + 0.9415s^3 + 1720s^2 + 6.776e^4s}{s^4 + 3.323s^3 + 5.87e^4s^2 + 7.68e^4s + 8.28e^8} \quad (20)$$

根据辨识出的每个扭振模态下的系统传递函数,选择期望特征值后,利用直接代入法求得相应的状态反馈增益矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\text{mod1}} = \begin{bmatrix} 1.2763 & 7.9728 & 8.563e^3 & -1.527e^4 \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_{\text{mod2}} = \begin{bmatrix} 7.949 & 63.4847 & 1.87e^5 & 3.39e^5 \end{bmatrix}$$
(21)
$$\mathbf{K}_{\text{mod3}} = \begin{bmatrix} 12.0766 & 84.1915 & 3.77e^5 & 7.44e^5 \end{bmatrix}$$

根据式(21)得到的状态反馈增益矩阵,基于射 影控制原理求出每层控制器传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{-0.2636s - 41.86}{s^2 + 0.9261s + 8891} \tag{22}$$

$$G_2(s) = \frac{0.01003 \, s - 484.4}{s^2 + 30.52 \, s + 1.55 e^4} \tag{23}$$

$$G_3(s) = \frac{13.89s^3 - 192s^2 + 5.05e^5s - 8.285e^6}{s^4 + 12.23s^3 + 5.98e^4s^2 + 3.77e^5s + 8.54e^8}$$
(24)

最后将所求的每层 SSDC 叠加后加入到整流侧的主控制器上。

2.1 未加 SSDC

在 2 s 时在整流侧换流母线上施加三相接地短路 故障,故障持续时间为 0.02 s。系统未加入 SSDC 的 发电机转速时域仿真结果如图 3 所示。



Fig.3 Speed of generator without SSDC

由图 3 知,在系统发生扰动后,发电机转速发生 振荡且为放大趋势,系统会发生次同步放大现象。发 电机轴系各缸体间的转矩(标幺值)如图 4 所示。



Fig.4 Torsional vibration torques of generator without SSDC

由图 4 知,发电机的 4 个模块间有 3 个扭振模态, 每个扭振模态都是呈发散状态。采用 TLS-ESPRIT 算法同样可以辨识出每个振荡模态的详细参数,辨 识结果如表 1 所示。

表 1 未加 SSDC 的 TLS-ESPRIT 辨识结果 Table 1 Mode parameters identified by TLS-ESPRIT without SSDC

模态	振荡频率/Hz	衰减因子	阻尼比/%
1	13.2289	0.1722	-0.2073
2	24.3624	0.0349	-0.0151
3	29.9676	-0.1202	0.0639

由表1知,直流系统存在3个振荡模态,模态1 和模态2为负阻尼,容易造成SSO发散,模态3为弱 阻尼,当发电机组转速发生波动时,这个频率的模态 衰减较为缓慢,不利于系统稳定。

2.2 加 SSDC

根据式(22)—(24)基于射影控制设计的 SSDC 传递函数,加入到直流整流侧主控制器,发电机转速的时域仿真结果如图 5 所示。

82



Fig.5 Speed of generator with SSDC

由图 5 知,加入 SSDC 以后,发电机转速波动很快平稳,说明设计的 SSDC 有效。发电机轴系各缸体间的转矩(标幺值)如图 6 所示。





由图 6 知, 在加入 SSDC 以后, 发电机各模块之间的扭振转矩可实现快速平稳。由图 4 和图 6 的对比分析, 充分说明所设计 SSDC 的有效性, 且控制器阶数较低, 利于实际工程实现。

采用 TLS-ESPRIT 算法同样可以辨识出每个振荡模态的详细参数,辨识结果如表 2 所示。

表 2 加入 SSDC 的 TLS-ESPRIT 辨识结果 Table 2 Mode parameters identified by TLS-ESPRIT with SSDC

模态	振荡频率/Hz	衰减因子	阻尼比/%
1	13.3312	-0.5598	0.6683
2	24.5261	-3.9792	2.5826
3	30.3542	-3.8314	2.0100

将表 2 与表 1 对比分析知,加入 SSDC 以后,各 个模态的阻尼比均有大幅度的提高。

3 结论

提出利用射影定理可将原系统的主导特征根保 留并映射到低阶反馈控制器上的特点,设计 SSDC。 首先利用 TLS-ESPRIT 算法得到每个固有扭振模态 下的系统传递函数,然后选择保留特征根基于射影 控制设计出每个扭振模态的控制器传递函数,从而实 现各模态的分层控制。

根据某电网直流系统的实例仿真模型,得到3

个振荡模态所对应的控制器传递函数,经计算知所 设计的控制器阶数较低,有利于实际工程实现。且仿 真结果表明,加入 SSDC 后,发电机轴系的振荡可快 速平稳,系统阻尼比有很大提高,表明所设计控制器 的有效性。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:1-16.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill, 1994:1025-1068.
- [3] 程时杰,曹一家,江全元.电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2009:308-317.
- [4] 孙彦龙, 班连庚, 宋瑞华, 等. 采用 STATCOM 与 SEDC 的多机系 统次同步谐振抑制措施[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1341-1345. SUN Yanlong, BAN Liangeng, SONG Ruihua, et al. Study on damping scheme of subsynchronous resonance in a multi-machine system by combination of SEDC with STATCOM[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1341-1345.
- [5] 吴熙,蒋平. SEDC 与 TCSC 联合抑制次同步振荡的研究[J]. 电 工技术学报,2012,27(4):179-184.

WU Xi, JIANG Ping. Research on sub-synchronous oscillation mitigation using supplementary excitation damping controller and thyristor controlled series capacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4):179-184.

- [6] 张剑,肖湘宁,高本峰. 并联型无源与有源次同步振荡阻尼装置 对比分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):77-82. ZHANG Jian,XIAO Xiangning,GAO Benfeng. Comparative analysis between parallel-type passive and active subsynchronous oscillation damping devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(6):77-82.
- [7] JOWDER F A R A,BOON-TECK O. Series compensation of radial power system by a combination of SSSC and dielectric capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1):458-465.
- [8]陈刚,江道灼,吴兆麟.固态限流器抑制轴系扭振的研究[J].电 工技术学报,2006,21(5):104-109.
 CHEN Gang,JIANG Daozhuo,WU Zhaolin. Suppressing axial torsion vibrations on turbine shafts by solid state fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21 (5):104-109.
 [9]朱旭凯,周孝信,田芳,等.基于本地测量信号的 TCSC 抑制次同
- 9] 未泡說,同孝信,而方,寺. 茲丁本地國重信号的 ICSC 抑制次问 步振荡附加控制[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):22-25. ZHU Xukai,ZHOU Xiaoxin,TIAN Fang,et al. Supplementary damping control of TCSC for subsynchronous oscillation based on local measured signal[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):22-25.
- [10] 伍凌云,李兴源,龚勋,等. 基于模糊免疫方法的次同步阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):12-16.
 WU Lingyun,LI Xingyuan,GONG Xun,et al. Design of subsynchronous damping controller based on fuzzy immune method[J].
 Automation of Electric Power Systems,2007,31(11):12-16.
- [11] 江全元,程时杰,曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻 尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):87-91.
 JIANG Quanyuan,CHENG Shijie,CAO Yijia. Design of HVDC supplementary subsynchronous damping controller using genetic

algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11):87-91.

- [12] BJORKLIND H, JOHANSSON K E, LISS G. Damping of subsynchronous oscillations in systems containing turbine generators and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007,22(1);314-323.
- [13] 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 multichannel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):89-93.
- [14] 伍凌云,李兴源,杨煜,等. 基于 Prony 辨识的次同步阻尼控制器研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(9):12-17.
 WU Lingyun,LI Xingyuan,YANG Yu,et al. Subsynchronous damping controller design using Prony identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(9):12-17.
- [15] PIWKO R J,LARSEN E V. HVDC system control for damping of subsynchronous oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(7):2203-2211.
- [16] 蒋平,吴熙,罗曦. 基于 TLS-ESPRIT 算法的附加励磁阻尼控制 抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):25-29.

JIANG Ping, WU Xi, LUO Xi. SSO mitigation using supple-

mentary excitation damping controller based on TLS-ESPRIT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10):25-29.

- [17] WISE K A, NGUYEN T. Optimal disturbance rejection in missile autopilot design using projective controls [J]. Control Systems, IEEE, 1992, 12(5):43-49.
- [18] OGATA K. 现代控制工程[M]. 5 版. 卢伯英,佟明安,译. 北 京:电子工业出版社,2012:549-556.

作者简介:



李 宽(1988—),男,山东枣庄人,博士 研究生,主要从事电力系统高压直流输电的 研究工作(**E-mail**:lk_0313@sina.com);

李兴源(1945—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究:

李保宏(1986—),男,四川达州人,硕士 研究生,从事高压直流输电、电力系统稳定与

控制方面的研究;

陈 实(1977—),男,河北通县人,讲师,博士,研究方向 为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电。

Design of supplementary subsynchronous damping controller based on projective theorem for hierarchical control

LI Kuan, LI Xingyuan, LI Baohong, CHEN Shi

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

Abstract: The design of subsynchronous damping controller is particularly important for HVDC system to prevent the possible torsional vibration of connected large thermal power units. The shaft torsional vibration modes are extracted by filters based on the system state equation, the supplementary subsynchronous damping controller is designed based on TLS-ESPRIT and projective theorem to realize the hierarchical control for each vibration mode. The projective control retains the dominant eigenvalues of system, which reserves the actual system information while reduces the controller order. An actual DC system is taken as an example simulation model and the simulative results show that, the damping controller based on TLS-ESPRIT and projective theorem for hierarchical control increases the system damping effectively and achieves the quick damping of subsynchronous vibrations. The order of controller is low and its engineering implementation is easy.

Key words: HVDC power transmission; subsynchronous oscillation; projective control; supplementary subsynchronous damping controller; damping; hierarchical control; design