

基于 Prony 辨识的次同步阻尼控制器研究

伍凌云¹, 李兴源¹, 杨煜², 洪潮², 刘海洋¹, 付伟¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 发展了基于 Prony 算法的辨识系统传递函数的方法, 将其用于交直流混合输电系统的次同步振荡模式分析和阻尼控制设计, 通过对输出信号动态时域数据的 Prony 辨识得到了系统的等值降阶线性模型, 分析出次同步振荡的模式, 在此基础上采用极点配置方法设计出抑制次同步振荡的附加直流阻尼控制器。设计步骤为: 在待研机组电气距离较近处施加低幅短时间的负荷扰动, 对该机组的转子角速度暂态响应进行 Prony 辨识, 获取系统的降阶线性传递函数模型, 对于选定的极点, 对阻尼控制器的参数取一估计值, 配置阻尼控制器后, 重复 Prony 辨识过程, 并依据辨识结果调整阻尼控制器参数, 直至闭环系统的 Prony 辨识极点与选定的极点相近。EMTDC 仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: Prony 系统辨识; 次同步振荡; 交直流混合输电系统; 次同步阻尼控制器

中图分类号: TM 571

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0012-05

0 引言

随着电力电子技术的发展, 高压直流输电系统在我国的应用日趋广泛^[1]。目前, 南方电网的输电系统已经形成“六交三直”西电东送的大通道, 天广、贵广、三广等多条直流相继投运, 贵广 II、云广直流也在建设与规划中。高压直流输电系统的快速控制可以提高交流系统的稳定性, 但在一定条件下会引起系统的次同步振荡(SSO)^[2]。次同步振荡是一类严重的系统稳定性问题, 不但会使系统产生振荡现象, 而且极易造成汽轮发电机组的大轴损毁^[3]。准确分析系统的次同步振荡特性以及采取有效抑制措施对保持系统稳定运行有重要意义。

国内外专家学者对次同步振荡现象进行了大量研究^[4-11], 提出了一系列分析方法与防范措施。较为典型的方法是通过求解小扰动方程计算系统特征值, 得出与振荡模式相关的信息, 然后进行控制器的设计。而这类方法在实际复杂系统中难以实现, 极易形成“维数灾”。

近年来, Prony 算法被广泛用于电力系统稳定控制的研究^[12-14]。应用 Prony 辨识法可直接从时域仿真数据或实测数据通过辨识技术得到系统的等值线性模型, 能提供和特征值分析法同样的信息, 而不需要列写大规模的系统方程和建立系统的详细模型, 避免了求解大规模矩阵的特征值这一难题。在此发展了基于 Prony 算法的辨识系统传递函数的方法,

将其用于交直流混合输电系统的次同步振荡模式分析和阻尼控制设计, 通过对输出信号动态时域数据的 Prony 辨识得到了系统的等值降阶线性模型, 利用极点配置技术, 设计了单输入单输出结构的附加次同步振荡阻尼控制器 SSDC(SubSynchronous oscillation Damping Controller)。以 2008 年南方电网贵广 II 直流系统为例, EMTDC 仿真结果证明了该方法的有效性。

1 系统辨识的 Prony 算法简介^[15]

Prony 辨识算法是用指数函数的线性组合模拟等间隔采样数据的方法, 最早于 1975 年由 Prony 提出。假设按等时间间隔 Δt 进行采样的 N 个数据点, 可由 p 个指数函数的线性组合模拟, 即

$$y(n) \approx \mathbf{Z}\mathbf{B}^T = \sum_{i=1}^p [A_i e^{j\theta_i} e^{n(\sigma_i + j2\pi f_i)\Delta t}] \quad (1)$$

式中 $y(n)$ 为第 n 个采样点, 且 $n=0, 1, \dots, N-1$; $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, \dots, z_p]$ 为 Prony 极点, $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_p]$ 为相应留数; A_i 为幅值; θ_i 为初相; σ_i 为衰减因子; f_i 为频率。

下面描述 Prony 辨识算法的计算步骤。

a. 利用采样数据点构造矩阵 $\mathbf{Y}$, 并求解方程组(2)。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(n) & y(n-1) & \cdots & y(0) \\ y(n+1) & y(n) & \cdots & y(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-1) & y(N-2) & \cdots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}\mathbf{A}^T = \mathbf{0}$$

其中, $\mathbf{A} = [1, a_1, a_2, \dots, a_p]$ 。当 $N > 2p$ 时, $\mathbf{A}$ 为方程组的最小二乘解。

b. 求解由系数 $a_1, a_2, \dots, a_p$ 构成的多项式(3), 该多项式的根即为 Prony 的 p 个极点。

$$Z^p + a_1 Z^{p-1} + \dots + a_{p-1} Z + a_p = 0 \quad (3)$$

c. 进一步利用最小二乘求解方程组(4),以获取留数 B 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

d. 利用式(3)(4)计算结果,由式(5)计算出式(1)中模拟输入信号的线性组合的振幅、相位、衰减因子和频率各量。

$$\begin{aligned} A_i &= |b_i| \\ \theta_i &= \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)] \\ \sigma_i &= \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i &= \frac{\arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)]}{2\pi \Delta t} \end{aligned} \quad (5)$$

在利用 Prony 辨识进行电力系统次同步振荡分析时,采样时间段一般取为 1~2 s,采样间隔不大于 2 ms。

2 系统模型

所研究的系统为 2008 年南方电网中的贵广 II 高压直流及其整流侧的附近机组。2008 年底,南方电网将建成贵广 II 高压直流输送通道,届时南方电网将成为“六交四直”的典型多馈入直流与交流互联输电系统,如图 1 所示。

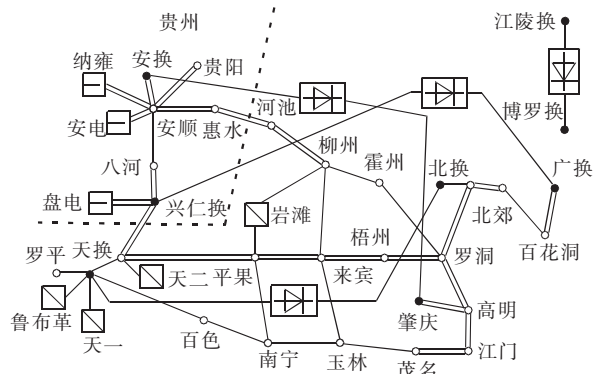


图 1 2008 年南方电网结构图

Fig.1 Structure of Southern China Power Grid in 2008

其中,贵广 I、II 回直流输电工程整流侧附近有较多汽轮发电机组,相对于三广及天广直流输电系统而言,更容易引发次同步振荡现象。贵广 I 直流输电工程起点为贵州境内安顺换流站,途经贵州、广西、广东三省(区),终点为广东肇庆市境内肇庆换流站,直流线路总长 936 km,其额定直流电压为 ± 500 kV,额定直流电流为 3 000 A,正常潮流模式最大输送功率为 2 700 MW。贵广 II 回直流输电工程起点为贵州境内兴仁换流站,途经贵州、广西、广东三省(区),终点为广东白花洞换流站,直流线路总长 1 210 km,其额定直流电压为 ± 500 kV,额定直流电流为 3 000 A,正常潮流模式最大输送功率为 2 700 MW。

使用 PSCAD/EMTDC 软件对系统进行建模,系统模型包含贵广 I、II 直流系统及其整流侧 500 kV 主要

交流输电线路、邻近区域中的主要发电机及相关控制装置。为保证计算精度并缩短计算时间,对与次同步振荡特性关系密切的发电机和直流系统采用详细模型,对与之影响较小的系统元件采用简化模型。发电机使用基于派克方程的精确模型,考虑了磁路饱和的影响,其调速器和励磁调节器采用工程资料的相应控制环节进行模拟。对高压直流输电系统采用详细的电磁暂态仿真模型^[16],其接线如图 2 所示。

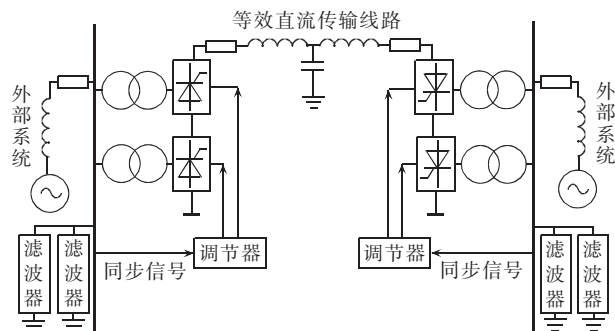


图 2 高压直流输电系统接线示意图

Fig.2 Connections of HVDC system

从换流站的高压交流母线起,对换流变、换流阀用三相电路分别模拟,对换流变使用非线性函数表示其饱和效应,对直流线路采用分段 T 型线路表示,计入滤波器和平波电抗器,控制器的模拟则用实际工程资料的相应控制器的传递函数。对系统中普通变压器不考虑激磁阻抗的作用,仅计入漏抗。交流输电线路的电阻、电抗以及充电电容采用集中参数的 π 型等值电路表示。对典型大功率负荷使用随电压和频率变化的动态模型表示。

3 次同步振荡特性分析及阻尼控制器设计

贵州电网结构复杂,采用交直流混合输电的方式对外输送功率,贵广 I、II 回直流系统整流站又较为靠近,使得系统次同步振荡特性也非常复杂。贵广 I、II 回直流系统附近都有一定数量的火电机组,不仅装机容量较大,而且与直流系统整流站联系紧密。以贵广 II 回直流整流站附近盘南机组为例,在一些运行方式下该机组与贵广 II 直流系统的机组作用系数(UIF)超过 0.2,根据 EPRI 报告的建议,UIF 值大于 0.1 时有必要对其次同步振荡特性进行考察。在此,首先使用 Prony 方法分析系统的次同步振荡模式,然后根据辨识方法得出的系统等值降阶线性模型的特征值信息,采用极点配置技术设计 SSDC。

3.1 系统次同步振荡模式分析

采用冲击响应的 Prony 辨识算法^[17]得出系统的等值降阶线性模型。然后,根据辨识的信息对盘南机组及贵广 II 回直流系统进行次同步振荡模式分析,在系统进入稳态后,对其施加冲击扰动。为了不影响系统的运行性能,输入 $x(t)$ 选为低幅短时间的负荷扰动。因为扰动时间相对极短(1 ms),可视为冲激函数。输出 $y(t)$ 选为盘南机组的转子角速度偏差。

设 $g(t)$ 为系统传递函数, 则

$$G(s) = Y(s) / X(s) \quad (6)$$

式中 $X(s)$ 、 $Y(s)$ 为系统输入 $x(t)$ 、输出 $y(t)$ 的拉氏变换; $G(s)$ 为 $g(t)$ 的拉氏变换。

由卷积理论知:

$$Y(s) = G(s)X(s) = L \left[\int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau \right] \quad (7)$$

当 $t < 0$ 时, $g(t) = 0, x(t) = 0$ 。

将式(7)拉氏反变换得:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (8)$$

如果输入冲击函数 $x(\tau)$ 是 K 倍幅值的单位脉冲, 其拉氏反变换为 K , 则当初始系统为稳态, 即 $t=0$ 时, $x(t)=0, y(t)=0$, 有

$$Y(s) = KG(s) \quad (9)$$

根据式(9), 便可由系统响应得出传递函数。

在实际系统中应用上述方法时, 应考虑测量误差和噪声的影响。这里研究的系统规模较大, 动态特性复杂, 如果直接使用转子角速度偏差作为输出 $y(t)$, 数值计算误差或噪声对分析方法精度的影响较大, 而且会导致辨识结果中系统阶数过高。为提高次同步振荡模式的辨识精度, 在运用上述方法进行辨识前, 需先将发电机的转子角速度偏差进行滤波处理。根据机组的自然扭振频率, 采用了 4 阶 Butterworth 低通滤波器对数据信号滤波, 截止频率选取为 45 Hz。

施加冲击扰动后, 使用 EMTDC 电磁暂态仿真程序得到时域仿真数据。然后对时域仿真数据进行采样, 时间间隔为 1 ms。为避免在非平稳过程中测取数据, 数据测取时间可选在系统冲击扰动后振荡曲线相对稳定一段。根据采样数据进行 Prony 系统辨识, 得到系统的等值降阶线性模型。为验证辨识所得线性模型的准确度, 将前述冲激输入也加到由 Prony 辨识得到的传递函数模型上, 得到图 3 所示结果。

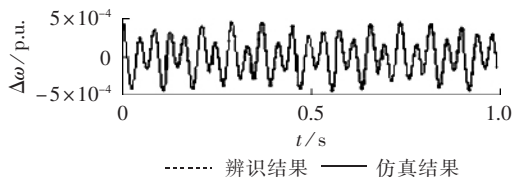


图 3 仿真和 Prony 辨识结果

Fig.3 Results of simulation and Prony identification

从图 3 可以看出, 辨识得出的线性模型的冲击响应输出与实际系统仿真数据拟合较好。将滤波后的角速度偏差信号采用 Prony 算法得到系统线性模型后, 由式(5)可以计算出系统次同步振荡模式的有关信息。为排除由低频振荡为主导模式的振荡对次同步振荡模式分析结果造成的影响, 以下的计算结果中列出了低频振荡模式信息以作参考。

大量研究与工程实践表明, 直流输电系统在与火电机组有较强耦合或整流侧触发角较大时容易引起次同步振荡, 为此, 这里选取了几种典型的运行方式进行考察。盘南机组在次同步频率段其轴系的自然扭振频率分别为 13.6 Hz、24.6 Hz、30.7 Hz。以此为

参照, 对该机组的次同步振荡特性进行分析。

3.1.1 强交流连结运行方式、直流系统正常运行

强交流连结方式是指兴仁换流站与八河、兴义变电站有双回 500 kV 交流母线连结。

表 1 中等值线性模型的模式 1、模式 2 和模式 3 反映了盘南机组在强交流连结运行方式下与贵广 II 回直流作用的次同步振荡模式, 它们分别对应于盘南机组高中压缸与低压缸 A、低压缸 A 与低压缸 B、低压缸 B 与发电机转子间的扭振模式。从表 1 中可以看出, 这 3 种模式对应的特征值实部均为负值, 说明此运行方式下系统的次同步模式都是稳定的; 但阻尼比较小, 振荡衰减缓慢。

表 1 强交流连结运行方式次同步振荡模式 Prony 辨识结果

Tab.1 Prony identification of SSO mode under strong-AC-link operation

模式	振荡频率/Hz	阻尼比	特征值
0	1.162	3.932	$-0.2872 \pm j7.299$
1	13.370	0.160	$-0.1343 \pm j84.008$
2	24.770	6.181	$-9.6390 \pm j155.641$
3	31.600	3.366	$-6.6868 \pm j198.518$

3.1.2 弱交流连结运行方式、直流系统降压运行

弱交流连结运行方式是指断开兴仁换流站与兴义变电站的双回 500 kV 交流母线连结的运行方式。在此运行条件下的振荡模式分析结果如表 2 所示。

表 2 弱交流连结运行方式次同步振荡模式 Prony 辨识结果

Tab.2 Prony identification of SSO mode under weak-AC-link operation

模式	振荡频率/Hz	阻尼比	特征值
0	1.122	5.444	$-0.3846 \pm j7.055$
1	13.470	4.724	$-4.0022 \pm j84.632$
2	24.820	-0.268	$0.4179 \pm j155.946$
3	28.530	0.610	$-1.0929 \pm j179.258$

由表 2 可见, 盘南机组在弱交流连结运行方式、直流系统降压运行时, 24.82 Hz 的振荡模式不稳定, 这说明此运行方式下系统有发生次同步振荡的危险。

3.1.3 孤岛运行方式、直流系统降压运行

孤岛运行方式是指断开兴仁换流站与八河、兴义变电站的双回 500 kV 交流母线连结, 贵广 II 回直流换流站附近的发电机组仅通过直流线路向外输送功率。在此运行方式下的盘南机组的振荡模式分析结果如表 3 所示。

表 3 孤岛运行方式次同步振荡模式 Prony 辨识结果

Tab.3 Prony identification of SSO mode under isolated-island operation

模式	振荡频率/Hz	阻尼比	特征值
0	0.965	8.176	$-0.4973 \pm j6.062$
1	13.136	-0.033	$0.0270 \pm j82.537$
2	24.092	0.040	$-0.0602 \pm j151.374$
3	30.313	2.710	$-5.1629 \pm j190.462$

从表 3 可以看出, 盘南机组在孤岛运行方式下, 13.136 Hz 的振荡模式不稳定, 这说明此运行方式下

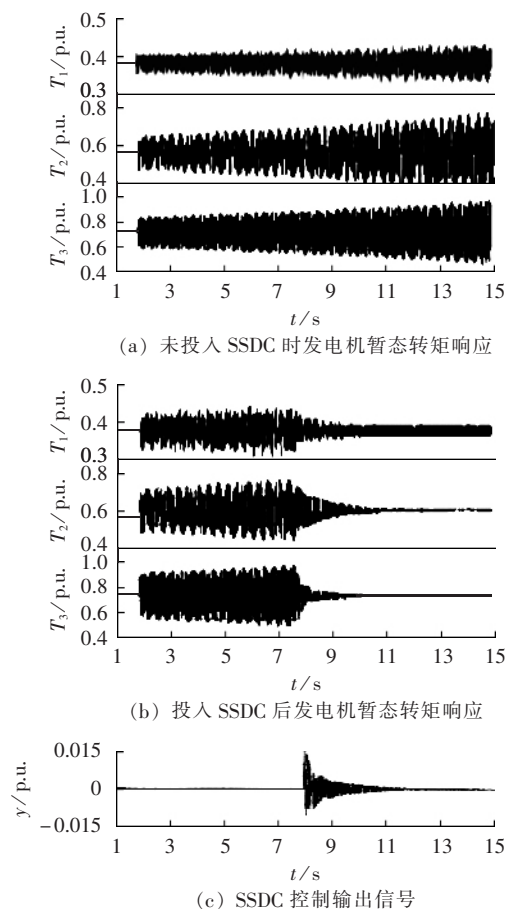


图 5 发电机暂态转矩时域仿真图
Fig.5 Simulative transient response of generator torque in time-domain

5 结论

将 Prony 辨识方法应用于复杂交直流系统的次同步振荡的研究。从时域仿真结果数据辨识得到系统降阶的等值线性模型,根据系统的响应信号直接估计次同步振荡模态。在此基础上,采用极点配置方法设计了符合工程实际应用的附加直流阻尼控制器。EMTDC 电磁暂态时域仿真结果证明,该方法能有效分析复杂交直流混合输电系统中的次同步振荡模态,基于该辨识结果设计的阻尼控制器能较好地抑制次同步振荡,并且具有一定的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [2] BAHMAN M, LARSEN E V, PATEL H S. Experience with HVDC-turbine generator torsional interaction at square butte[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(3): 966-975.
- [3] WALKER D N, BOWLER C E J, JACKSON R L, et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.
- [4] 胡云花, 赵书强. 电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 6-11.
HU Yun-hua, ZHAO Shu-qiang. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automa-

tion Equipment, 2005, 25(7): 6-11.

- [5] 杨煜, 陈陈. 次同步谐振的线性化解析与阻尼系数处理[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 8-10.
YANG Yu, CHEN Chen. Linearization analysis of subsynchronous resonance and determination of generator mechanical damping [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 8-10.
- [6] 吴俊勇, 肖东晖, 程时杰, 等. 特征结构分析及在电力系统次同步谐振研究中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 1-3.
WU Jun-yong, XIAO Dong-hui, CHENG Shi-jie, et al. Eigen structure analysis and its application to the study on the SSR of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 1-3.
- [7] IEEE Working Group 15.05.05. Planning DC link terminating at AC locations have low short-circuit capabilities. Part 1: AC/DC interaction phenomenon[R]. USA: Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1992.
- [8] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Canada: McGraw-Hill, Companies, Inc, 1994.
- [9] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part I and part II [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3630-3647.
- [10] 胡云花, 赵书强. 电力系统低频振荡和次同步振荡的阻尼耦合分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 15-17.
HU Yun-hua, ZHAO Shu-qiang. Analysis of damping coupling relation between LFO and SSO of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(9): 15-17.
- [11] 倪以信, 陈寿荪, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [12] 苏小林, 周双喜. Prony 法在同步发电机参数辨识中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9): 1-4.
SU Xiao-lin, ZHOU Shuang-xi. Application of Prony method to parameter identification of synchronous generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9): 1-4.
- [13] 魏伟, 赵书强, 马燕峰. 基于 Prony 算法的模糊电力系统稳定器设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 54-59.
WEI Wei, ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng. Design of fuzzy power system stabilizer based on Prony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 54-59.
- [14] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联电网 PSS 参数优化设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-11.
GUAN Xiu-peng, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. PSS parameter optimization on large-scale interconnection power grid based on Prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 7-11.
- [15] SMITH J R, HAUSER J F, TRUDNOWSKI D J. Transfer function identification in power system applications[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1282-1290.
- [16] 王路, 李兴源. 复杂交直流系统的双时标混合协调仿真[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 28-32.
WANG Lu, LI Xing-yuan. Hybrid dual-time scale simulation technology for complex AC-DC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 28-32.
- [17] 任锦堂. 系统辨识[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1989.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

伍凌云(1976-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 主要从事高压直流输电的研究工作(E-mail: wu_lyun@163.com);

李兴源(1945-), 男, 四川宜宾人, 教授, 博士研究生导师, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分散式发电等方面的研究。

Subsynchronous damping controller design using Prony identification

WU Ling-yun¹, LI Xing-yuan¹, YANG Yu², HONG Chao², LIU Hai-yang¹, FU Wei¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: The transfer function method based on Prony identification is developed and applied to SSO (SubSynchronous Oscillation) mode analysis and damping controller design of HVDC/AC transmission systems. The reduced-order linear model of the complex hybrid transmission systems is achieved by using Prony identification of the output signal dynamic data in time-domain, and the SSO mode is then obtained. Based on it, an additional HVDC SSDC (SubSynchronous oscillation Damping Controller) is designed for SSO suppression by using the pole configuration. Steps are: exert instantaneous load disturbance on generator connecting point; carry out Prony identification of rotor speed transient response to get the reduced-order system model; set the estimated SSDC parameters for a preset pole; repeat Prony identification to adjust SSDC parameters until the closed-loop system pole is close to the preset pole. Simulation with EMTDC shows the effectiveness of design.

This project is supported by the Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217907) and the National Natural Science Foundation of China (50595412 & 50377017).

Key words: Prony identification; subsynchronous oscillation; HVDC/AC transmission system; SSDC