

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

赵 睿,李兴源,刘天琪,王渝红,杨毅强,李 宽

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 采用矩阵束算法分析了实际交直流混合输电系统在孤岛运行方式下次同步和低频振荡共存的现象,并获得保留系统关键特性的低阶模型。采用带通滤波器分离低频和次同步振荡模式,基于降阶模型设计多通道直流附加阻尼控制器。该控制器能够降低振荡模式间的相互影响,通过单独调节各通道的增益、相位、输出限幅及滤波器参数为不同频段的振荡提供恰当的阻尼,进而同时抑制次同步和低频振荡。EMTDC/PSCAD 实例仿真证明了控制器的有效性。

关键词: 次同步振荡; 低频振荡; 直流附加阻尼控制; “三华”电网; 阻尼

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.015

0 引言

在智能互动电网的大背景下,强交流与强直流并存已成为“三华”特高压同步电网的必然选择。目前,向上、溪浙和锦苏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局面^[1]。这种特殊的系统基本只由若干个大型电厂与送端换流站群联接构成,极有可能孤岛运行。在孤岛运行方式下,HVDC 的快速控制引起次同步振荡的风险增加,并可能伴随因发电机转子间阻尼不足而引起的低频振荡。2 种不同性质的振荡相互作用,一旦控制不当,就会恶化系统阻尼,甚至造成孤岛系统的崩溃^[2-6]。所以,针对“三华”电网向上直流孤岛运行方式,研究同时抑制次同步振荡和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器具有重要意义。

当前,基于数学模型的严格控制理论方法应用于“三华”电网实际工程时,复杂拓扑和多变工况的存在,增加了系统建模的难度。因此,利用辨识方法通过非线性时域仿真或现场测量数据直接导出简单的、精确的系统低阶线性化模型,并设计控制器具有广泛的实用价值。

本文基于具有高运算效率和抗扰能力的矩阵束算法辨识向上直流在孤岛运行下的次同步和低频振荡频率、阻尼,以及系统降阶模型,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,同时抑制次同步和低频振荡。数字仿真验证了该控制器的有效性。

1 基于矩阵束算法的系统特性分析

矩阵束算法^[7]直接以测量数据构成的 Hankel 矩阵为基础,避免求取信号的相关矩阵;同时,数据被分解为信号子空间和噪声子空间,通过信号空间来辨识信号参数。这提高了运算效率和抗噪能力,适用于大系统小扰动下的振荡特性分析和模型辨识。

1.1 系统振荡特性分析

孤岛运行方式,向上直流系统降功率至 25 % (1 600 MW)单极运行,福溪、珙县、泸州与黄桷庄各开 2 台机。利用机组作用系数法^[8]对向上直流在以上方式下引发四川电网次同步振荡的风险进行评估。机组作用系数(UIF)的计算结果如表 1 所示。

表 1 机组 UIF 计算结果
Tab.1 Calculated UIF of generators

电厂名称	电厂出力/MW	UIF
福溪	2×600	0.1054
珙县(500 kV)	1×600	0.1077
珙县(220 kV)	1×600	0.0720
泸州	2×600	0.0662
黄桷庄	2×200	0.0109

由表 1 可知,在以上构造的孤岛方式下,福溪、珙县电厂相关机组的 UIF 计算结果超过 0.1。因此,相关火电厂同复龙换流站之间的相互作用增强,加大了引发交直流互联电网次同步振荡的风险。

在搭建电磁暂态模型时,主要考虑 500 kV 线路,对于 220 kV 的线路和负荷进行适当的等值处理。向上直流系统孤岛运行的拓扑结构如图 1 所示。

利用矩阵束算法辨识系统的次同步振荡和低频振荡模式,结果如表 2 和表 3 所示。

由表 2 和表 3 可知,孤岛运行方式,向上直流系

收稿日期:2013-03-19;修回日期:2013-12-29

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A119);国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204);国家自然科学基金重点资助项目(51037003);国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-027-2012)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A119),the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2013CB228204),the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51037003) and the State Grid Corporation of China,Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG001-027-2012)

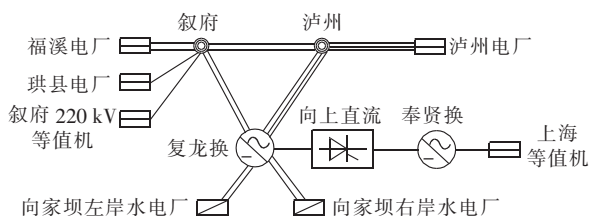


图 1 测试系统网络结构图

Fig.1 Network structure of test system

表 2 扭振模式

Tab.2 Torsional oscillation modes

电厂名称	振荡频率/Hz	阻尼比/%
福溪	13.4	0.06
	24.5	0.10
珙县	13.4	0.06
	24.5	0.11

表 3 低频振荡模式

Tab.3 Low-frequency oscillation modes

电厂名称	振荡频率/Hz	阻尼比/%
福溪	0.74	2.07
	1.23	3.74
珙县	0.74	2.07
	1.24	3.74

统降功率至 25%(1600 MW)单极运行的情况下,福溪与珙县电厂的次同步振荡和低频振荡并存,13.4 Hz 和 24.5 Hz 的次同步振荡模式,阻尼比接近 0,造成轴系扭振情况严重;并且,0.74 Hz 的低频振荡模式属于弱阻尼振荡模式。

1.2 系统降阶模型辨识

根据次同步和低频振荡研究的现象和解决的问题,孤岛运行方式下的大规模电力系统可考虑用保留系统关键特性的低阶模型代替原来复杂的高阶系统模型。

考虑如下连续的时间系统.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX + Du\end{aligned}\quad (1)$$

对式(1)做分块处理,可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (2)$$

$$Y=[C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} + Du$$

其中, $\mathbf{X}_1$ 为需要保留的状态量; $\mathbf{X}_2$ 为对系统的影响可忽略的状态量。令 $\mathbf{X}_2=0$, 则降阶模型为:

$$\begin{aligned}\dot{X}_1 &= (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})X_1 + (B - A_{12}A_{22}^{-1}B_2)u \\ Y &= (C_1 - C_2A_{22}^{-1}A_{21})X_1 + (D - C_2A_{22}^{-1}B_2)u\end{aligned}\quad (3)$$

在系统进入稳态后,对其施加阶跃扰动。为不影响系统的运行性能,输入 $x(t)$ 选择由 2.0 s 时刻直流整流侧定电流控制信号的低幅值阶跃扰动激发。输

出 $\gamma(t)$ 选为福溪机组的转子角速度偏差。

利用矩阵束算法辨识系统的等值降阶模型。根据 Hankel 矩阵奇异值分解后所得奇异值的突变, 确定降阶模型阶数。该模型辨识考虑靠得很近的零极点对消, 并忽略远离原点的极点及其对应的留数。同时, 保留的关键特性包括对给定的一类输入有最小的输出误差和同样的主振模式。

2 控制器设计

2.1 多通道直流附加阻尼控制器结构

直流附加阻尼控制器抑制次同步振荡和低频振荡时,可能对某个模式提供正阻尼,而对另一模式提供负阻尼,甚至激发新的振荡模式。因此,通过在直流附加阻尼控制器中加设滤波器,抑制模式间的相互影响,进而分别对不同的振荡模式提供阻尼^[9-15]。

多通道直流附加阻尼控制器结构如图 2 所示。图中,滤波环节为 Butterworth 滤波器;校正装置采用根轨迹法进行设计; $\Delta\omega$ 为发电机转速偏差; I 为整流侧直流电流; α 为整流侧触发延迟角。

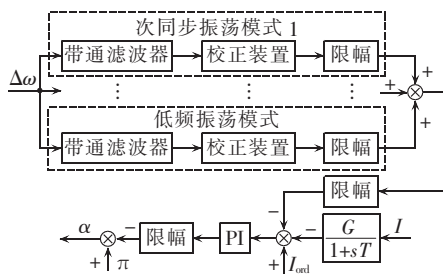


图 2 多通道直流附加阻尼控制器结构

Fig.2 Structure of multi-channel DC supplementary damping controller

2.2 多通道直流附加阻尼控制器参数设计

用根轨迹法进行的设计是建立在改变系统根轨迹的基础上,是通过在系统开环传递函数中增加极点和零点,迫使根轨迹经过 s 平面内希望的闭环极点的一种方法^[16-18]。设辨识出的系统传递函数为 $G(s)$, 输出为控制器的输入信号,控制器的传递函数为 $G_c(s)$,则加入控制器后的闭环系统方框图见图 3。

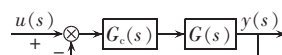


图 3 控制系统

Fig.3 Control system

加入控制器后的闭环传递函数为 $\frac{y(s)}{u(s)} =$

$\frac{G_c(s)G(s)}{1+G_c(s)G(s)}$ 。由性能指标可确定闭环主导极点的希望位置。通过绘制原系统的根轨迹图,在只调整增益不能产生希望的闭环极点时,可根据闭环系统的特征方程 $1+G_c(s)G(s)=0$,计算主导闭环极点位于希望位置时的幅角缺额,从而进行相位补偿,并选

择合适的放大倍数。

针对 13.4 Hz 的次同步振荡频率,通过滤波环节后,系统在该频率附近的根轨迹如图 4 所示。

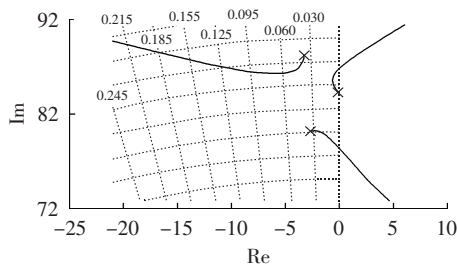


图 4 根轨迹图
Fig.4 Root-locus plot

由图 4 可知,在 $K_1 > 0.124$ 时,系统不稳定。取 $K_1 = 0.058$,则在 s 上半平面内距离虚轴最近的 2 个闭环极点分别为 $s_1 = -0.622 + j85.5$ 和 $s_2 = -1.72 + j80$,其对应的阻尼比分别为 $\xi_1 = 0.00727$ 和 $\xi_2 = 0.0216$,阻尼自然频率分别为 $\omega_{d1} = 85.5 \text{ rad/s}$ 和 $\omega_{d2} = 80 \text{ rad/s}$,振荡衰减为其初值的 10% 分别需要 3.70 s 和 1.34 s。因此,通过只调整增益即可产生希望的闭环极点。

同理,针对 24.5 Hz 的次同步振荡频率,取 $K_2 = 0.063$,则在 s 上半平面内距离虚轴最近的闭环极点为 $s_1 = -1.22 + j156$,其对应的阻尼比为 $\xi = 0.00786$,阻尼自然频率为 $\omega_d = 156 \text{ rad/s}$,振荡衰减为其初值的 10% 需要 1.8874 s。

为确保低频振荡能在较短时间内衰减,相对次同步振荡,系统需要有更大的阻尼比。针对 0.74 Hz 的弱阻尼振荡模式,通过 Butterworth 带通滤波器后,系统的根轨迹如图 5 所示。

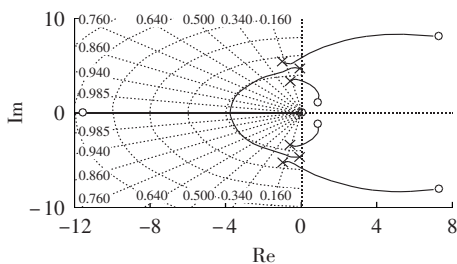


图 5 根轨迹图
Fig.5 Root-locus plot

从图 5 的根轨迹图可以看出,系统仅在有限的 K_3 值范围内,即 $0 < K_3 < 0.162$ 时,才是稳定的。取 $K_3 = 0.032$,则在 s 上半平面内距离虚轴最近的 3 个闭环极点分别为 $s_1 = -0.582 + j5.26$ 、 $s_2 = -0.565 + j4.66$ 和 $s_3 = -0.468 + j3.49$,其对应的阻尼比分别为 $\xi_1 = 0.11$ 、 $\xi_2 = 0.12$ 和 $\xi_3 = 0.133$,阻尼自然频率分别为 $\omega_{d1} = 5.29 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_{d2} = 4.7 \text{ rad/s}$ 和 $\omega_{d3} = 3.52 \text{ rad/s}$,振荡衰减为其初值的 10% 时分别需要 3.9563 s、4.0754 s 和 4.9201 s。

3 仿真分析

根据图 2 控制器,对图 1 系统进行数字仿真。控制器参数设置为 $K_1 = 0.058$ 、 $K_2 = 0.05$ 、 $K_3 = 0.032$ 。

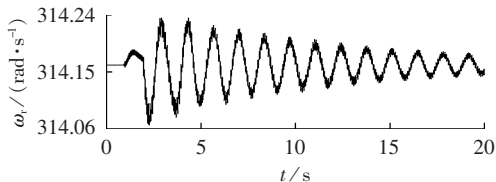
数字仿真的扰动方式如下:

a. 2 s 时刻,系统受到一个扰动,该扰动使得整流侧定电流控制器的电流整定值由 1 p.u. 增加至 1.02 p.u.;

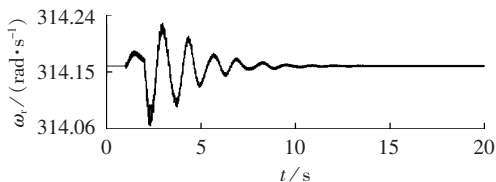
b. 2 s 时刻,宜宾—泸州单回线路在距向家坝母线 1% 处发生单相短路接地故障,0.2 s 后故障消失(瞬时故障)。

根据系统特点和控制目标,选取福溪电厂机组进行观测。以上 2 种扰动下,配置多通道直流附加阻尼控制器前后,福溪电厂的转子角速度 ω_r 和轴系扭矩(标么值)分别如图 6 和图 7 所示。图 7 中, T_{A-B} 为低压缸 A 到低压缸 B 的扭矩, T_{B-C} 为低压缸 B 到发电机的扭矩。

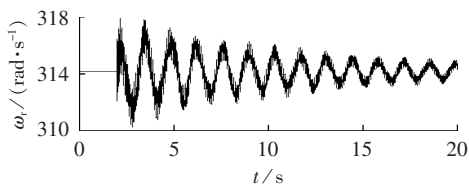
由图 6、7 可知,基于矩阵束算法辨识系统传递函数,利用根轨迹法设计的多通道直流附加阻尼控制器,在不同故障下,均有效防止了针对某一振荡频率设计的阻尼控制器对另一振荡频率的负阻尼作



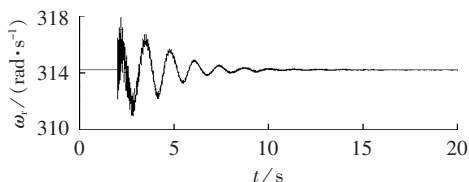
(a) 扰动 a 下投入多通道直流附加阻尼控制器前



(b) 扰动 a 下投入多通道直流附加阻尼控制器后



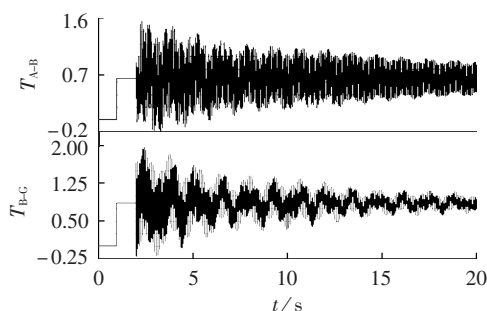
(c) 扰动 b 下投入多通道直流附加阻尼控制器前



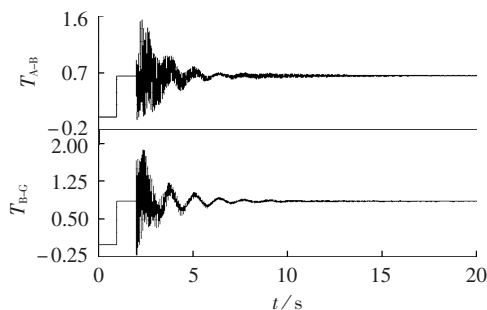
(d) 扰动 b 下投入多通道直流附加阻尼控制器后

图 6 不同扰动下投入多通道直流附加阻尼控制器前后的转子角速度图

Fig.6 Rotor angular speed charts,before and after multi-channel DC supplementary damping controller operates for different perturbations



(a) 投入多通道直流附加阻尼控制器前



(b) 投入多通道直流附加阻尼控制器后

图7 扰动b下投入多通道直流附加阻尼控制器前后的轴系扭矩图

Fig.7 Torque plots of axis system, before and after multi-channel DC supplementary damping controller operates for perturbation b

用,不仅有效抑制了 24.5 Hz 和 13.4 Hz 的次同步振荡频率,而且增大了 0.74 Hz 的低频振荡模式的阻尼。

4 结论

本文采用矩阵束算法辨识与根轨迹法相结合的方法,设计多通道直流附加阻尼控制器。电磁暂态时域仿真结果表明,该方法能有效分析复杂交直流混合输电系统在孤岛运行方式下的次同步振荡和低频振荡模式,降低振荡模式间的相互影响,同时抑制次同步和低频振荡,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[M]. 北京:科学出版社,2010:1-9.
- [2] 胡云花,赵书强,马燕峰,等. 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 Yunhua,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,et al. Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):6-11.
- [3] 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 Yunhua,ZHAO Shuqiang. Analysis of damping coupling relation between LFO and SSO of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(9):15-17.
- [4] ANDERSSON G,ATMURI R,ROSENQVIST R,et al. Influence of hydro units' generator-to-turbine inertia ratio on damping of subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1984,103(8):2352-2361.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:304-309.
- [6] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York,USA: McGraw-Hill,1994:11-21.
- [7] 朱瑞可,李兴源,赵睿,等. 矩阵束算法在同步电机参数辨识中的应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(6):52-55,84.
ZHU Ruike,LI Xingyuan,ZHAO Rui,et al. Application of matrix pencil algorithm in synchronous machine parameters identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(6):52-55,84.
- [8] PIWKO R J,LARSEN E V. HVDC system control for damping of subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1982,PAS-101(7):2203-2211.
- [9] WALKER D N,BOWLER C E J,JACKSON R L,et al. Results of subsynchronous resonance test at Mohave[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1975,94(5):1878-1889.
- [10] HAMMAD A E,EI-SADEK M. Application of a thyristor controlled VAR compensator for damping subsynchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1984,PAS-103(1):198-212.
- [11] PILOTTO L A S,SZECHTMAN M,WEY A,et al. Synchronizing and damping torque modulation controllers for multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1995,10(3):1505-1513.
- [12] JIANG Q Y,CAO Y J,CHENG S J. A genetic approach to design a HVDC supplementary subsynchronous damping controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1059-1064.
- [13] KIM D J,NAM H K,MOON Y H. A practical approach to HVDC system control for damping subsynchronous oscillation using the novel eigenvalue analysis program[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1995-2002.
- [14] 武凌云,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] 陈中,胡吕龙. 基于阻尼转矩分析法的多广域阻尼控制器多模式交互影响分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):92-96.
CHEN Zhong,HU Lulong. Interaction of multiple wide-area damping controllers based on DTA method[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):92-96.
- [16] 伍家驹,孙红艳,刘斌,等. 基于 CIGRE HVDC 控制器的 PI 参数可视化整定方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):115-120,126.
WU Jiaju,SUN Hongyan,LIU Bin,et al. Visualized tuning of PI parameters for CIGRE HVDC controller[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):115-120,126.
- [17] OGATA K. Modern control engineering[M]. Prentice,New Jersey,USA:Prentice Hall,2010:311-342.
- [18] PILOTTO L A S,BIANCO A,LONG W F,et al. Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):243-252.

作者简介:



赵睿

赵睿(1986-),男,四川内江人,博士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(E-mail:succzr1@163.com);

李兴源(1945-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

基于自适应复合控制的同步电机软起动 自动准同期并网控制方法

金光哲,徐殿国,高 强,寇佳宝,李志城

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 相角滑差的稳定是同步电机软起动系统中自动准同期装置并网成功的关键要素。分析得出了在双闭环调速系统中,电流环动态特性非理想条件下,采用速度比例积分控制器会引起滑差的不稳定,因此提出了自适应复合速度控制方法。在升速阶段采用单比例自适应速度控制算法,克服了传统比例控制器无法消除静差的问题;在准同期阶段,采用了基于相角滑差的准同期控制算法,解决了滑差不稳定的问题,并给出了可靠的并网判决策略。实验证明了自适应复合速度控制算法的正确性,最后运用该算法实现了同步电机软起动系统可靠并网。

关键词: 自动准同期; 复合速度控制; 相角滑差; 同步电机; 并网; 自适应控制; 软起动

中图分类号: TM 341

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.016

0 引言

大功率同步电动机的起动及并网困难是其应用的重大障碍,并成为限制产业发展的重大技术难题。自动准同期装置是大功率同步电动机软起动装置中非常重要的组成部分。准同期装置并网时,确保电网电压与电机端电压相位一致是至关重要的,特别是大功率同步电动机并网时,相位差引起的并网冲击电流会对电网质量以及电网的稳定性等造成较大的影响^[1-5]。

确保并网时刻相位一致,难点在于并网指令发出到接触器主触头闭合需要一定的时间,要在控制算法中,预估出这段时间内相角差的变化量,即准确

计算出相角导前角 d 。针对导前角的预报,文献[6-7]提出了微分预报法。微分预报法认为滑差是稳定的,相角变化量与合闸时间成线性关系,但测量误差会随着合闸时间变大;文献[8-9]采用积分预报的原理,可以极大减少噪声对预报的误差,即使在加速度滑差或随机滑差的情况下,也能获得较准确的导前时间。但以上 2 种预报方法均假设电机在并网时速度恒定。实际上,发电机并网前速度可能是波动的,而且合闸时间越长,近似认为发电机恒速计算出的合闸角误差越大。文献[10-12]提出的滑差预报的分析方法,能较准确地描述发电机匀速或变速情况下的相角变化。文献[13]将模糊控制应用于准同期并网判决中,用模糊判决提高并网可靠性。上述文献通过合闸前滑差的变化预估相角导前角并提出了有效的算法,但对并网合闸指令给出之后并网接触器合闸这段时间内的滑差变化无能为力。无论采用何种

收稿日期:2013-10-28;修回日期:2014-01-17

基金项目:国家发改委重大技术产业开发项目

Project supported by the NDRC Major Technology Industrial Development Project

Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression

ZHAO Rui, LI Xingyuan, LIU Tianqi, WANG Yuhong, YANG Yiqiang, LI Kuan

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

Abstract: The coexistence of subsynchronous oscillation and low-frequency oscillation in actual AC-DC system operating in island mode is analyzed by the matrix pencil method and the order-reduced model retaining its essential characteristics is obtained, based on which, a multi-channel DC supplementary damping controller is designed. Band-pass filters are adopted to separate the subsynchronous and low-frequency oscillations and reduce the mutual impact between two oscillation modes. The gain, phase, output limit and filter parameters of each channel are separately tuned to support proper damping for the oscillation in different bands for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression. EMTDC/PSCAD simulation verifies the effectiveness of the designed controller.

Key words: subsynchronous oscillation; low-frequency oscillation; DC supplementary damping control; “San-Hua” Power Grid; damping