

采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制

谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 韩英铎

(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 在大型互联电力系统中, 区间模式的低频振荡是限制传输能力的严重瓶颈之一, 而经典阻尼控制(如 PSS)因限于局部测量不能很好地解决这个问题。迅速发展的广域测量系统能在全网范围内精确测量和高速传递机组相对功角和角频率等量, 使得采用广域测量信号构成全局性的区间阻尼控制系统成为可能, 进而为提高互联电网的功角稳定性和传输容量提供了契机。文中在一个简单的 2 区 4 机电力系统中, 研究了采用广域测量信号实现励磁控制器区间阻尼控制环节的设计原理、实现方法和仿真效果, 说明了基于广域测量系统的区间阻尼控制能有效抑制区间低频振荡和提高互联系统的传输容量, 而且可工程实现。同时就设计适用于复杂电力系统的广域阻尼控制系统提出了一些关键性理论和实际问题, 以供进一步深入研究。

关键词: 相量测量单元; 广域测量系统; 阻尼控制; 电力系统稳定器

中图分类号: TM761

0 引言

随着电力系统规模的扩大, 区域间的低频振荡正成为限制电网传输能力的瓶颈, 而现有的阻尼控制器(主要是电力系统稳定器(PSS))并不能很好地解决这一问题。根本原因在于: ①不能直接利用相对功角和角速度构成闭环控制。虽然采用相对功角和角频率来实现阻尼控制是最直接和有效的, 但长期以来缺少必要的测量方法, 只能采用其他间接变量来代替, 导致控制效果不佳。②限于本地局部信息。采用本地测量构成反馈控制, 不能很好地反映区间振荡模式, 导致控制系统虽然能阻尼本地振荡模式, 但难以有效抑制区间振荡模式。③缺乏动态协调能力。分散、局部设计的 PSS 可能由于缺少彼此协调而使低频振荡现象重新出现乃至加剧, 采用分散协调控制理论设计的阻尼控制器可在特定工况下获得静态协调特性^[1], 但是大电网系统的模型复杂、运行方式众多、振荡模式多变, 使得离线设计的静态协调控制的有效性受到限制。

信息处理和通信技术的迅猛发展推动了电力工业应用技术的进步, 使得现有阻尼控制的固有缺陷逐渐被克服, 尤其是自 20 世纪 90 年代兴起的同步相量技术和广域测量系统(WAMS——wide-area measurement system), 给电力系统的监测、分析和控制提供了新的手段, 为互联电网阻尼控制带来新

的契机^[2~4]。本文将就如何应用 WAMS 实现有效和实用的区间阻尼控制这一问题进行探讨, 抛砖引玉, 以切实解决大电网的低频振荡问题, 提高系统的稳定性和传输能力。

1 区间阻尼控制的新机遇

同步相量最初的含义是指被打上同步时标的电网电压/电流正序基波相量, 但目前实用的相量测量单元(PMU——phasor measurement unit)可同步采集表征电网运行状态的几乎所有的(当然也是需要的)变量, 最为关键的, 它能测量发电机内电势、转子角、角速度、母线电压相位等与低频振荡密切相关的量。在高速通信网络(如电力数据宽带网)的支持下, 各 PMU 采集的带时标的的数据能以较小的延时(数十毫秒到数百毫秒内)传递到数据中心站, 完成同步处理和分析, 构成 WAMS。它为克服现有阻尼控制的固有缺陷创造了条件: ①可在一定延时而内获取机组间的相对功角和角频率, 将其作为阻尼控制器的反馈输入构成闭环控制在工程上是可行的, 这在国内外 WAMS 应用工程中已得到充分证明^[5,6]。②向分散布置的阻尼控制器提供全局信息, 使其能有效抑制本地和区间两种模式的低频振荡^[4]。③数据中心站(准)实时获取系统当前的运行状态, 分析其振荡模式, 进而动态优化各分散阻尼控制器的参数, 实现自适应式的全局协调型阻尼控制系统。

由于 WAMS 根本上克服了现有阻尼控制的固有缺陷, 从而为构建新型的区间阻尼控制系统带来了机遇。随着 WAMS 技术的迅速发展, 特别是通

过工程应用获得了实际经验和初步效益,开发采用广域测量信号的区间阻尼控制系统成为一个热点问题。目前,国内外在这一方面的研究主要集中在工程可行性论证和仿真分析方面^[3~6],虽然尚没有实际应用结果的报道,但相关的开发工作正在进行中,预计在几年内将会出现成功的应用工程。

2 简单实例研究

考虑图 1 所示的 2 区域 4 机电力系统^[7],参数见文献[7],图中标出了一种典型工况下的潮流。

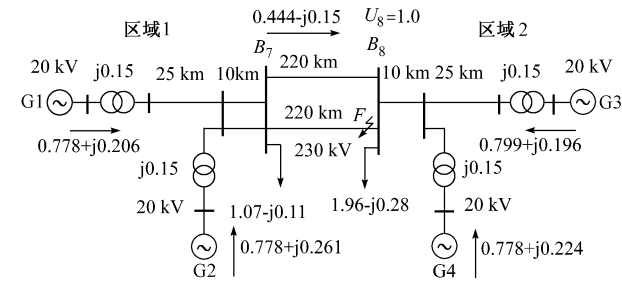


图 1 2 区域 4 机电力系统

Fig. 1 A two-area four-machine power system

4 台机组均采用晶闸管式快速励磁控制器,结构如图 2 所示,省略了限幅环节。AVR 参数为: $K_A=200$, $T_R=0.01$ s, $T_A=0$ s, $T_B=0.01$ s, $E_{fd,max}=5.64$, $E_{fd,min}=-4.53$; 机组 G1 和 G2 安装了经典 PSS,输入为机组角速度,传递函数为: $f_{PSSi}(s)=20 \frac{10s(1+0.05s)(1+3.0s)}{(1+10s)(1+0.03s)(1+5.4s)}$ 。阻尼控制的限幅范围为 $-0.1 \sim 0.2$ (标么值)。

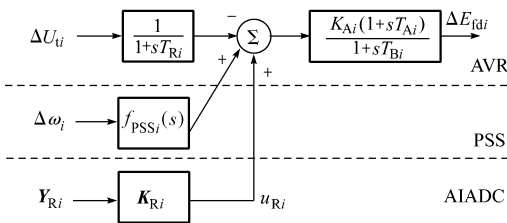


图 2 晶闸管式快速励磁系统(包括 PSS 和 AIADC)

Fig. 2 Thyristor excitation system with PSS and AIADC

研究表明^[7],当仅安装 AVR 式励磁控制器时,上述系统存在频率分别约为 1.1 Hz 和 0.6 Hz 的本地和区间两种振荡模式,而主要是后者限制了联络线传输能力。为进行比较,作者在机组 G1 和 G2 上增加采用广域测量信号的附加区间阻尼控制(AIADC——additional inter-area damping control)环节。AIADC 环节可表示为:

$$u_{Ri} = K_{Ri} Y_{Ri} \quad i = 1, 2$$

式中: K_{Ri} 为静态反馈增益; Y_{Ri} 为区间相对功角和角频率。其中:

$$Y_{Ri} = \begin{bmatrix} \frac{H_1 \Delta \delta_1 + H_2 \Delta \delta_2}{H_1 + H_2} - \frac{H_3 \Delta \delta_3 + H_4 \Delta \delta_4}{H_3 + H_4} \\ \frac{H_1 \Delta \omega_1 + H_2 \Delta \omega_2}{H_1 + H_2} - \frac{H_3 \Delta \omega_3 + H_4 \Delta \omega_4}{H_3 + H_4} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2$$

K_{Ri} 采用线性最优方法设计,步骤为:①在典型运行方式下对系统进行小范围线性化,得到其线性状态空间数学模型,该模型包含机组的 AVR 和经典 PSS;②采用线性二次型方法,将 AIADC 的设计转化为标准的输出反馈最优控制问题^[2];③利用直接迭代算法求解对应的 Levine-Athans 方程组^[8],获得 AIADC 的反馈系数为:

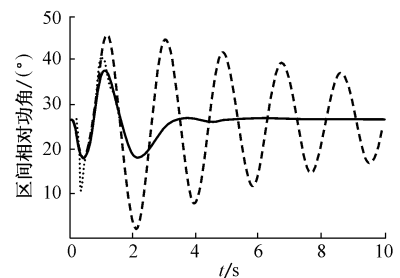
$$K_R = \begin{bmatrix} K_{R1} \\ K_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.073 & 1 & 22.34 \\ -0.033 & 8 & 21.86 \end{bmatrix}$$

上述控制器设计假设广域测量是瞬时完成的,但实际情况是:从 PMU 得到各机组的绝对功角和角速度,传递到数据中心,算出能反映区间振荡的相对量,再传递到对应励磁控制器,此过程会产生一定的延时。假设 PMU 为等间隔采样,每隔 20 ms 发送一次相量数据,且励磁控制器得到广域测量信号延时为 120 ms,作者采用最小二乘预测算法,由既往的 PMU 测量序列得到控制器当前的反馈输入。

为了验证控制系统的有效性,在 MATLAB6.5 环境中进行仿真分析。

a. 三相短路故障下系统的动态特性

0.1 s 时母线 B_8 左侧联络线出口发生三相经 0.1 Ω 电阻金属性短路,故障线路在 0.2 s 切除,0.2 s~0.9 s 间,单回联络线运行,0.9 s 重合闸操作成功,恢复双回线运行。图 3、图 4 分别为区间相对功角 Y_{R1} 和相对角频率 Y_{R2} 的动态特性。



— 有附加区间阻尼控制; --- 无附加区间阻尼控制
..... 有附加区间阻尼控制时的预测值

图 3 短路故障后的区域间功角振荡曲线
Fig. 3 Inter-area power angle oscillation following short circuit fault

b. 联络线最大传输功率

在有功负荷总量、负荷功率因数、机组间功率分配比例及母线 B_7 和 B_8 电压幅值保持不变的情况下,将 B_7 上的负荷逐步转移到 B_8 上,从而增加联络线传输功率,遭受同 a 中一样的短路故障时,结果

为:无附加区间阻尼控制时,联络线最大传输功率 $74.12\% P_m$;有附加区间阻尼控制时,联络线最大传输功率 $80.14\% P_m$ 。提高幅度 6.0% ,约 52.2 MW 。其中 $P_m = U_7 U_8 / X_{11} = 0.969 3, X_{11} = 0.99$ 。

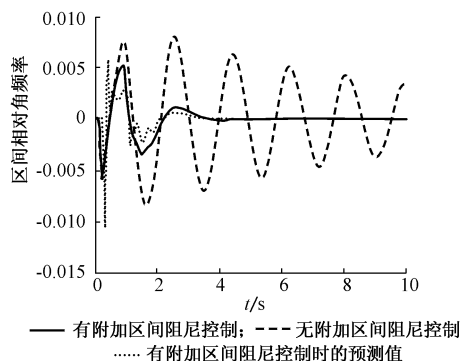


图4 短路故障后的区域间相对角频率振荡曲线
Fig. 4 Inter-area relative angular frequency following short circuit fault

图5所示为当联络线功率达到 $75\% P_m$ 、发生同a中一样的短路故障时区域间功角振荡过程。

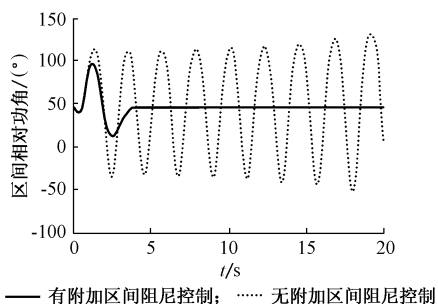


图5 联络线重载时短路故障后的区域间功角振荡曲线
Fig. 5 Inter-area power angle oscillation following short circuit fault with large across-area power transfer

上述仿真表明,安装经典 PSS 后,对 1.1 Hz 附近的区内振荡有较好的阻尼作用,却不能很好地抑制 0.6 Hz 的区间低频振荡;而采用广域测量信号反馈的 AIADC 能很好地改善区间阻尼特性。图3和图4显示,采用 AIADC 后,系统能在较短的时间内有效抑制区域间的振荡。图5表明,当联络线重负荷时发生严重的短路故障,AIADC 能确保系统稳定,否则系统将由于欠阻尼而发生多摆失稳。

上述实例表明,采用广域测量信号反馈能获得更好的区间阻尼控制效果,从而证明了基于 WAMS 构建区间阻尼控制系统的可用性和价值。相应控制器的结构和算法都很简单,是实际系统中的现存技术,因此该方法是可以工程实现的。

3 关键技术问题

实际电网远比4机系统复杂,同时,控制设计还

有很多更有效的方法,需要做进一步的理论研究,并结合实际系统需求和应用条件进行技术开发和工程实施。作者认为,对于大规模互联电网,基于 WAMS 来构造区间阻尼控制系统,需要解决好以下理论和实际问题。

a. 高性能 WAMS 的实现:作为信息源的 WAMS 必须有足够的可靠性、准确性和实时性,否则,以此为基础的阻尼控制系统的有效性便无从谈起。根据作者的经验,准确性的关键是 PMU 的同步方法和测量算法,特别是功角、角频率等的测量精度至关重要;实时性主要取决于通信网络和中心站实时数据库的性能;而可靠性是系统硬软件及其构成的整体的性能所决定的。

b. 分散阻尼控制器的设计:实际电力系统中,阻尼控制功能分散在机组励磁、FACTS 等控制器中,虽然它们在实现形式上千差万别,但都要解决几个共同的问题:①阻尼控制与其他控制功能的关系。如在第2节的励磁控制器中,阻尼控制输出是 AVR 辅助输入量。②本地模式和区间模式阻尼控制的关系。在图2中,它们是并列关系,但这并非必须的。③阻尼控制规律的设计。这是各种先进控制理论“施展才华”之所在,但采用广域测量信号进行反馈控制需要解决一个关键问题,即计及通信延时的控制算法设计。对于采用本地测量的阻尼控制而言,信息传输的时间可忽略不计或采用简单的传递函数式延时环节来近似,而在广域稳定控制中,通信延时明显加大(数十毫秒~数百毫秒),且具有随机特性和同步问题。研究表明^[9],在这种情况下,不考虑通信延时而设计的控制器在实际应用中性能将恶化甚至不能正常工作;该问题在控制理论领域也是一个难题,有待于结合电力系统实际情况进行深入研究;第2节中采用的预测方法,是一种简单有效但并非惟一和最有效的解决之道。④采用广域测量导致的可靠性问题。广域稳定控制的完整实现高度依赖于通信网络的可靠性,但通信系统存在一定的误码率,并可能意外中断。解决这个问题可以从2个方面来综合考虑:一是提高通信网络的可靠性,如采用双网络冗余设计和一定的协议和编码校验机制;二是在设计阻尼控制系统时,使其具有如下特性:一旦通信不正常,系统能确保在次优的状态下运行,性能不低于无通信(即局部控制)情况,如第2节中的励磁控制器,本地 PSS 与区间阻尼控制环节处于并列关系,即使通信故障,本地 PSS 仍能正常运行。

解决上述两个问题后,即可获得简单的区间阻尼控制系统,但针对大型互联电网,实现全局的动态协调型阻尼控制系统,还需进一步解决以下问题:

a. 全局阻尼控制系统的动态协调设计和实现。在 WAMS 提供系统动态运行信息的基础上, 研究大电网阻尼控制的动态协调控制设计理论、算法和实现技术, 如振荡模式的在线分析、分散阻尼控制器的配置、控制目标、参数的全局性动态优化等。

b. 系统模型问题。无论是分散阻尼控制器, 还是全局协调型阻尼控制系统, 在其设计时都需要一定的数学模型, 由于实际系统规模巨大、运行方式复杂, 采用第 2 节的小范围线性化模型已不可行, 一个现实的办法是在线辨识降阶模型, 因此, 研究基于 WAMS 的系统振荡模型的实时辨识算法显得非常重要。目前, 作者正在开发的动态 Prony 算法和子空间辨识算法 N4SID 正是为了解决这个问题。

4 结语

新兴的 WAMS 技术能全局测量和快速传输机组相对功角和角频率等数据, 克服现有阻尼控制固有缺陷, 为互联电网的阻尼控制、特别是抑制区间低频振荡带来新的契机。实例说明, 采用广域测量信号构成闭环阻尼控制, 能有效抑制区间低频振荡和提高互联系统的传输容量, 而且可以工程实现。但是, 基于 WAMS 实现复杂大系统的广域阻尼控制尚需研究和解决一系列关键性的理论和实际问题。

参考文献

- 1 韩英铎, 王仲鸿, 陈淮金 (Han Yingduo, Wang Zhonghong, Chen Huaijin). 电力系统最优分散协调控制 (Optimal Decentralized Coordinated Control of Power Systems). 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1997
- 2 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等 (Han Yingduo, Wang Zhonghong, Lin Kongxing, et al). 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态安全分析与监测系统 (Three New Front Subjects in Power Systems——FACTS, Intelligent Control and Dynamic Security Analysis and Monitor System

Based on GPS). 清华大学学报 (Journal of Tsinghua University), 1997, 37(7): 1~6

- 3 Kamwa I, Grondin R, Hébert Y. Wide-area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems——A Decentralized/Hierarchical Approach. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 136~153
- 4 Aboul-Ela M E, Sallam A A, McCalley J D, et al. Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 767~773
- 5 Hauer J F. Validation of Phasor Calculations in the Macrodyne PMU for California-Oregon Transmission Project Tests of March 1993. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1224~1231
- 6 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等 (Luo Jianyu, Wang Xiaoying, Lu Tingrui, et al). 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用 (Application of Real-time Dynamic Monitoring System of Power Network Based on Wide-area Measurement Technology). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(24): 78~80
- 7 Kundur Prabha. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill Inc, 1993
- 8 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等 (Xie Xiaorong, Cui Wenjin, Tang Yiliang, et al). 求解推广 Levine-Athans 方程组的直接迭代算法 (Direct Iterative Algorithm to Solve the Extended Levine-Athans Equations). 清华大学学报 (Journal of Tsinghua University), 2001, 41(3): 1~4
- 9 Krtolica R, Özgüner Ü, Chan H, et al. Stability of Linear Feedback Systems with Random Communication Delays. International Journal of Control, 1994, 59(4): 925~953

谢小荣 (1975—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统分析与控制、同步相量技术和 FACTS 技术。E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

肖晋宇 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为同步相量技术及其应用。

童陆园 (1946—), 男, 教授, 长期从事电力系统分析和控制方面的研究和教学工作。

INTER-AREA DAMPING CONTROL OF INTERCONNECTED POWER SYSTEMS USING WIDE-AREA MEASUREMENTS

Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, Tong Luyuan, Han Yingduo (Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Inter-area low-frequency oscillation often is a serious bottleneck for increasing power transfer across interconnected power system, while existing damping controllers, such as PSS, provide inferior performance in dealing with this problem. The rapid development of wide-area measurement system, or WAMS, paves the way to accurately measure and quickly transfer relative power angles and rotor speeds of generators over the distance of a whole power system, and thus makes it possible to construct global inter-area damping control by using wide-area measurements. This presents a great potential in enhancing power-angle stability and transfer capability. For a simple two-area four-machine power system, this paper studied the designing principle, implementation method and simulation result of an inter-area damping control loop for generators' excitation controllers, thereby demonstrating the effectiveness of WAMS-based inter-area damping control and its possible realization in practical engineering. With regard to developing wide-area damping control for large-scale power systems, some key issues in both theory and practice are put forward for further research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59877011).

Key words: phasor measurement unit; wide-area measurement system; damping control; power system stabilizer (PSS)