

交直流互联系统附加控制器设计综述

王磊, 胡永银, 张珂

(国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 611133)

摘要: 附加控制器是提高交流系统低频振荡的阻尼和改善交直流互联系统暂态稳定性的一种有效方式。概述了基于不同控制理论的附加控制器, 并且介绍了附加控制器与励磁调节器、电力系统稳定器、灵活交流输电系统的协调控制。最后对交直流互联系统附加控制器的未来进行了展望。

关键词: 附加控制器; 励磁调节器; 电力系统稳定器(PSS); 灵活交流输电系统(FACTS); 协调控制

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2018)04-0037-07

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.009

Overview of Additional Controller Design in AC/DC Interconnected Power System

Wang Lei, Hu Yongyin, Zhang Ke

(Skill Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 611133, Sichuan, China)

Abstract: Additional controller is the effective way in increasing the damping of low-frequency oscillation in AC system and improving the transient stability in AC/DC interconnected power system. The additional controller based on different control theory is summarized, and the coordinated control of additional controller with excitation regulator, power system stabilizer, and flexible AC transmission system is introduced. Finally, the future of additional controller in AC/DC interconnected power system is prospected.

Key words: additional controller; excitation regulator; power system stabilizer (PSS); flexible AC transmission system (FACTS); coordinated control

0 引言

自1976年美国西太平洋联络线成功采用直流附加控制阻尼互联交流联络线功率振荡以来,已经过去了40年。利用高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统特有的附加控制功能抑制交直流互联系统的区间低频振荡在行业内已经形成了共识,但由于实际直流输电工程的传输容量以及与之相连的交流系统强度和对附加控制器的控制功能要求等条件不尽相同,所以根据它们自身特点设计的附加控制器各不相同,或者说没有一个通用的附加控制器设计方案^[1]。

中国典型的应用直流附加控制器的直流工程中,三峡—常州直流工程中的附加控制作为功率紧急支援使用;贵州—广州 I & II 和天生桥—广州直

流工程中的附加控制作为功率调制使用;葛洲坝—南桥直流工程中的附加控制作为无功调制使用;高岭背靠背直流工程中的附加控制则作为抑制次同步振荡使用。

附加控制器的设计理论从最初的基于比例积分(proportional integration, PI)到基于非线性控制理论,再发展到基于人工智能控制理论。其中的基于非线性控制理论的附加控制器相比于传统的PI控制器更能够反映电力系统实际运行的特性。所以非线性控制理论中的变结构理论、自适应控制理论、鲁棒控制理论等在附加控制器设计中越来越受到重视。同时,在同一个交直流互联系统中,由于安装了不同的附加控制器,各控制器之间通常会有一定的耦合,所以要想让这些附加控制器能够发挥各自的功能而又能将相互间的影响降到最低,相互间的协调控制必不可少。因此下面还研究了直流附加控制

器与励磁调节器、电力系统稳定器 (power system stabilizer, PSS)、灵活交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 之间的协调控制。最后对附加控制器的前景进行了展望。

1 交直流互联系统的拓扑模型

通常附加控制器的输入信号采用与直流系统相连的交流系统的信号, 比如电流、电压、频率等, 具体选择哪个信号由控制目标和系统的特性来决定。然后将这些反应系统异常的信号按照一定的控制理论处理后再作为直流系统的输入量, 进而调节直流系统的输出量^[2]。

典型的交直流互联系统如图 1 所示。

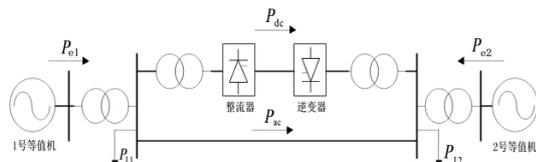


图 1 交直流互联输电系统结构

其中: 两个不同容量的电力系统分别用等值发电机 1 和 2 区分, 等值发电机 1 和 2 的负荷用 P_{L1} 与 P_{L2} 表示; 交流系统传输功率由 P_{ac} 表示, 直流系统传输的功率由 P_{dc} 表示; P_{e1} 表示等值发电机 1 的电磁功率, P_{e2} 表示等值发电机 2 的电磁功率; E_1 、 E_2 分别是等值发电机 1 和 2 的机端电压。

2 附加控制器对低频振荡的阻尼分析

根据文献 [3], 对于图 1 的交直流互联系统的等值发电机 1, 它的转子运动方程式为

$$H \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} + D \frac{d\delta_{12}}{dt} + P_{e1} = P_0 \quad (1)$$

式中: P_0 为原动机输入的机械功率; H 为等值发电机 1 的转动惯量; δ_{12} 为两台等值发电机间的功角差。

当与直流系统互联的交流系统发生扰动时, 先假设发电机 1 输入机械功率不发生变化, 则它的小扰动运动方程式为:

$$H \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + D \frac{d\Delta \delta_{12}}{dt} + \Delta P_{e1} = 0 \quad (2)$$

$$P_{e1} = P_{dc} + P_{ac} + P_{L1} \quad (3)$$

$$P_{ac} = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (4)$$

式中 X 为等值发电机 1 号和 2 号之间的等值电抗。将式 (4) 带入 (3) 可得

$$P_{e1} = P_{dc} + \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_{12} + P_{L1} \quad (5)$$

由式 (5) 可知 ΔP_{e1} 与 δ_{12} 、发电机 1 的电势 E_1 和直流传输功率 P_{dc} 均有关系, 恰当地调节 E_1 和 P_{dc} 均能改善系统的稳定性。当忽略等值发电机的自动励磁调节作用时, 假设直流传输功率 P_{dc} 按 δ_{12} 和它的导数进行变化, 如果不考虑 P_{dc} 调节的时间常数, 则 ΔP_{e1} 可由式 (6) 表示:

$$\Delta P_{e1} = \frac{dP_{e1}}{d\delta_{12}} \Delta \delta_{12} + K_1 \Delta \delta_{12} + K_2 \frac{d\Delta \delta_{12}}{dt} \quad (6)$$

式中: K_1 和 K_2 均为 P_{e1} 对调节信号的增益; $\frac{dP_{e1}}{d\delta_{12}}$ 为无自动励磁调节时的同步功率系数。于是式 (2) 的小扰动方程式修改为

$$H \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + (D + K_2) \frac{d\Delta \delta_{12}}{dt} + \left(\frac{dP_{e1}}{d\delta_{12}} + K_1 \right) \Delta \delta_{12} = 0 \quad (7)$$

式中: $D + K_2$ 为存在 P_{dc} 调节时的阻尼系数; $\frac{dP_{e1}}{d\delta_{12}} + K_1$ 为等效同步功率系数。

式 (7) 对应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta \delta_{12}}{dt} &= \Delta w_{12} \\ \frac{d\Delta w_{12}}{dt} &= -\frac{dP_{e1}/dt + K_1}{H} \Delta \delta_{12} - \frac{D + K_2}{H} \Delta w_{12} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

A 矩阵如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{dP_{e1}/dt + K_1}{H} & -\frac{D + K_2}{H} \end{bmatrix}$$

它的特征值为

$$p_{12} = -\frac{D + K_2}{2H} \pm \sqrt{\left(\frac{D + K_2}{2H} \right)^2 - \frac{dP_{e1}/d\delta_{12} + K_1}{H}} \quad (9)$$

由特征值推导出系统的稳定条件为: $D + K_2 > 0$ 和 $\frac{dP_{e1}}{d\delta_{12}} + K_1 > 0$ 。

由此可知, 直流功率 P_{dc} 按 δ_{12} 的偏差变化可改善等效的同步功率系数, 按导数变化可以增加系统阻尼, 合理地调节参数 K_1 和 K_2 , 可以适当地改善交流系统的暂态稳定性, 以上就是附加控制器的基本原理。

直流附加控制器的原理是在基本控制器的主控制级的功率给定值 P_{ref0} 中加入功率调制信号 P_{mod} 从而使参考值获得一个新的整定值 P_{ref} 如图 2 所示。

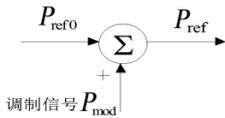


图 2 附加控制器的主控原理

直流附加控制又称直流调制,按照功能来分主要包括功率调制、频率调制、无功调制等。其中功率调制分为大方式调制和小方式调制,而频率调制分为单侧频率调制和双侧频率调制,以双侧频率调制为例说明直流调制的基本原理。包含附加控制器的 HVDC 输电系统总体原理控制框图如图 3 所示,其中虚线框部分是双侧频率调制的附加控制器。

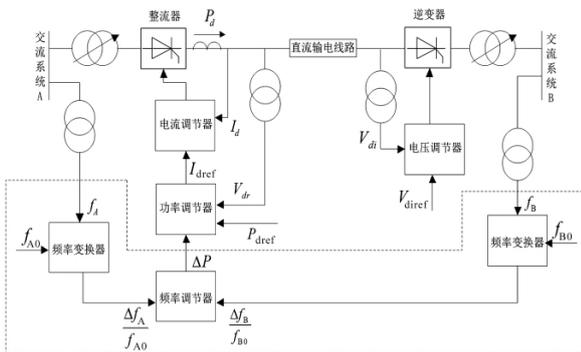


图 3 总体原理控制框

由图 3 可知,假设交流系统 A 和 B 的额定频率分别是 f_{A0} 和 f_{B0} 。正常运行时直流功率从系统 A 传输到系统 B。 Δf_A 、 Δf_B 各自为母线 A、B 上的频率偏移量。整流与逆变侧的频率变换器各自测量自身的相对频率偏差 $\frac{\Delta f_A}{f_{A0}}$ 和 $\frac{\Delta f_B}{f_{B0}}$,反馈量取整流和逆变侧的

相对频率偏差的差: $e = \Delta f_A' - \Delta f_B' = \frac{\Delta f_A}{f_{A0}} - \frac{\Delta f_B}{f_{B0}}$, ΔP 作为附加控制加在主控制上。由于 ΔP 直接加到功率调节器上面,能够直接改变直流传输功率的整定值,因此能够动态地调节交流系统的频率。

3 直流附加控制器

3.1 比例积分/比例微分控制器

比例积分 (proportional integration, PI) / 比例微分 (proportion integration differentiation, PID) 控制器的输入信号通过微分、滤波、放大、限幅等环节后输出,直接控制传输功率的变化,其原理图如图 4 和

图 5 所示。

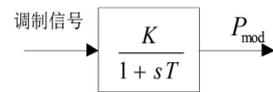


图 4 PI 型附加控制器

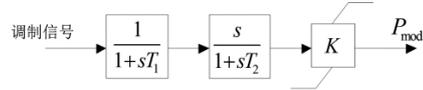


图 5 PID 型附加控制器

文献 [4] 基于 PID 原理设计出具有功率调制功能的附加控制器,并且在 4 机 2 区域的模型中仿真验证了该功能。文献 [5] 先通过 Prony 算法在线辨识出天广交直流互联系统等值线性模型的各项参数,然后在整流侧加入附加控制器,对于区域间低频振荡进行抑制。文献 [6 - 8] 分别设计了采用双侧频率调制的 PI/PID 附加控制器,分别对贵广和天广直流输电线路的暂态特性进行了研究,仿真结果表明只要控制器参数选择恰当,附加控制器对多馈入的区间低频振荡均有良好的抑制效果。

文献 [9] 基于 Mult-Agent 协调控制理论,对多馈入交直流互联系统采用 PI 附加控制器实现了直流功率调制的功能。文献 [10 - 11] 在 PI/PID 附加控制器基础上,先通过状态反馈线性化方法将该系统转化为线性控制系统,然后利用最优控制理论设计出线性二次型最优控制规律,最后将该控制规律应用到附加控制器设计之中,仿真结果验证了该控制器性能优于传统 PI 控制器。

然而,传统的 PI/PID 附加控制器的核心思想是通过控制系统的状态方程进行线性化处理。由前一节的推导可知,只有通过设置合理的参数才能使附加控制器产生相应的控制功能。然而实际电网结构和运行条件会不断变化,附加控制器的这些参数只能依靠大量仿真和实践经验来决定。所以基于该理论设计的附加控制器的自适应性和鲁棒性较差,很难适应未来越来越复杂的交直流互联系统,因此得考虑非线性附加控制器。

3.2 非线性变结构控制器

变结构控制,又称滑动模态控制,它是一种控制系统的设计方法,该理论最突出的特点是对加给系统的摄动和干扰有良好的自适应性和鲁棒性。该理论是通过控制作用使系统状态轨迹线运动到适当选取的切换流形,然后沿此切换流形渐近运动到平衡点。当系统一旦进入滑动模态运动,在一定条件下

就对外界干扰及参数摄动具有不变性。

文献[10, 12]在文献[13]只在基本控制器采用该理论设计的基础上,对附加控制器也采用变结构控制理论并取得了很好的控制效果。文献[14]在文献[12]的基础上,采用直接反馈线性化,先将原先的状态方程变成线性方程,然后通过滑动模态控制理论计算出相应的控制规律。

文献[15-16]则基于微分几何方法设计了变结构附加控制器。先采取状态反馈精确线性化理论,将原系统转化成高度能控的线性系统,再利用变结构理论推导出对应的控制器。

3.3 非线性自适应控制器

自适应控制系统的设计思想大体可分为两种类型:一种是改变可调系统的参数,使闭环系统的零极点分布始终合乎规定,该方法称为零极点补偿法或零极点分步法;另一种是改变可调系统的参数,使参考模型和可调系统输出间的差值最小,这就是通常所说的参考模型自适应控制系统。自适应控制系统能够根据运行条件修改增益,因此能够克服固定增益无法满足运行条件改变这一固有缺陷,因此具有很大的发展空间。

文献[17-18]应用该控制思想,利用递推法推导出了能够适合附加控制器设计的非线性控制规律,这种方法由于包含对系统等效阻尼系数的动态估计,因此对抑制区间低频振荡有很强的自适应性。

文献[19]将文献[20]中的自适应控制引入到附加控制器设计上,在文献[17-18]的基础上采用广域测量系统采集的全局信号作为附加控制器的输入,通过推导出自适应控制规律而设计出相应的附加控制器,在4机2区域中取得了很好的抑制区间低频振荡的效果。

文献[21]首次将自校正控制技术运用于附加控制器设计之中。先对发电机和励磁系统均采用三阶模型,而直流系统则采用准稳态模型,在此基础上,通过在线辨识获得所需控制规律的参数,然后基于广义最小方差控制和自适应控制理论设计了附加控制器,其控制效果在4机2区域中得到了很好的展现。文献[22]在文献[17-18]的基础上将反步法应用于多馈入的交直流互联系统的附加控制器的设计中,在IEEE 39节点模型中验证了它的控制功能。

3.4 鲁棒控制器

所谓鲁棒控制即在建立数学模型和设计控制器

的过程中考虑不确定因素的影响,控制器的设计基于不确定性的信息但又能满足某一期望指标的控制方法。

文献[23]在交直流互联系统的模型中首次引入微分几何方法,提出换流器可以采用非线性附加控制器的设计方法,对于以后的附加控制器的设计起到了开拓作用。但是在研究交直流互联系统稳定控制时,没有考虑直流线路的动态特性,而把对直流功率的调节视为一阶惯性环节来设计控制率,或者说是设计过程中忽略了系统的不确定性。

所以文献[24-25]在文献[23]的基础上,考虑了交直流互联系统各部分的动态特性,同时直流系统采用改进的响应模型,推导出一个五阶非仿射非线性数学模型,再对模型进行反馈线性化,设计出具有一定鲁棒性的附加控制器。文献[26]则采用微分几何理论先将实际系统进行精确线性化处理,再将鲁棒 H_∞ 理论应用于该线性化系统,从而设计出具有较强鲁棒性的附加控制器。

文献[27-28]基于直接反馈线性化方法和 H_∞ 控制理论推导出交直流互联系统的状态方程,其中的未知量反馈系数则通过MATLAB工具箱求解,在控制规律基础上再设计出相应的具有一定鲁棒性和适应性的控制器。文献[29]在微分几何方法和 H_∞ 控制理论的基础上,推导出了一种适合交直流互联系统的非线性鲁棒控制器的规律。

文献[30-31]则基于Lyapunov函数直接推导出反映交直流互联系统的动态响应控制规律,所设计的附加控制器除了采用常规的角速度差作为输入信号外,还增加了功角差和功率偏差两个输入信号,仿真证明了该控制器对于抑制区间低频振荡效果优于传统的PI控制器。

3.5 智能控制器

智能控制主要包括分级递阶智能控制、专家控制、模糊控制以及基于神经网络控制等。以应用较多的模糊控制为例说明,模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制理论。模糊控制在复杂系统的建模和控制方面有着诸多优势,比如不需要知道被控对象的精确模型,易于实现对具有不确定性的对象和具有强非线性的对象进行控制,对被控对象特性参数的变化具有较强的鲁棒性,对控制系统受到的干扰具有较强的抑制能力等。

文献[32]通过将模糊控制理论与神经网络算法结合在一起,设计出模糊神经附加控制器用以阻尼区间低频振荡。而文献[33-36]则将PID控制和模糊控制两者的优点结合起来,设计出基于模糊自适应的PID附加控制器,仿真表明该附加控制器对于阻尼互联交流系统的低频振荡效果明显。文献[37]在模糊逻辑控制器基础上,将Bang-bang控制思想和能量函数法应用在附加控制器的设计之中,仿真验证了该套理论的正确性。

3.6 其他控制器

主要有从降低系统振荡能量角度方面考虑而设计出的附加控制器。文献[38-39]采用广域测量系统和相量测量单元技术对全局信号进行采集,再通过对系统进行等值,然后从广义哈密尔顿系统理论能够描述系统的能量特性这一点出发,同时考虑到交直流互联系统的内在结构和耗散特性,最终设计出能够提高交流系统暂态稳定性的附加控制器。

4 附加控制器与其他控制器的协调控制

4.1 附加控制器与励磁调节器的协调控制

文献[40]基于暂态能量下降法和模糊逻辑控制理论,设计出基于整流侧触发角控制和发电机励磁控制的模糊协调阻尼控制器,在4机2区域和8机36母线测试系统中验证它的良好功能。文献[41]先通过耦合发电机励磁控制系统与HVDC控制系统,再利用多指标非线性控制理论寻找到两个系统协调控制的规律,进而设计出相应的协调控制器,并在仿真中验证了该理论的可行性。

文献[42]则基于系统惯量中心和广域测量系统,对发电机励磁控制和直流附加控制器同时采用非线性鲁棒控制,还对两种控制进行了协调,其控制效果优于通用励磁控制器和传统附加控制器的组合。文献[43]在多馈入交直流互联系统中,通过先将控制系统分为交直流协调层和直流协调层,其中的交直流协调层主要负责直流附加控制器与其接近的发电机励磁控制之间的协调。由于在推导交流协调控制规律时应用了最优变目标控制理论,使得该协调控制规律具有一定的跟踪能力和自适应功能,仿真验证效果较好。文献[44]也在多馈入交直流互联系统中,设计了基于模糊控制理论的发电机励磁附加控制器和直流调制附加控制器,对两个控制

器的参数采用了遗传算法和序优化遗传算法,通过对比仿真效果后,得出采用序优化遗传算法进行的参数协调优化方法的鲁棒性较一般的遗传算法要好很多。

4.2 附加控制器与电力系统稳定器的协调控制

电力系统稳定器(PSS)和直流附加控制均通过借阻尼抑制交流系统的低频振荡,即两种控制是通过减弱与它们之间的弱相关的振荡模式的阻尼,来增强与它们之间强相关振荡模式的阻尼。PSS与直流附加控制均是通过改变增益进而达到重新分配系统的阻尼的目的。在此基础上,PSS和直流附加控制必须协调控制,才可能确定在增强系统中重要振荡模式或阻尼较弱的振荡模式的阻尼时效果一致^[45-46]。

文献[47-48]采用PSS对本地低频振荡进行抑制,而直流附加控制对区域间低频振荡进行抑制的方法,同时在参与因子的基础上利用遗传算法对两者的控制参数进行了逐个优化,仿真证明了该思想的可行性。

文献[49]提出利用控制敏感因子作为选择附加控制器安装具体地点和选择输入信号的指标,通过该指标找到了PSS控制器和附加控制器的协调控制策略,仿真证明了该理论的正确性。文献[50]通过多次使用Prony算法对交直流互联系统的PSS控制器和附加控制器的参数进行协调优化,最终获得能够抑制区间低频振荡的最优参数。而文献[51]则在辨识系统振荡频率和阻尼比的方法上采用了改进矩阵束算法,其基本原理与文献[50]一样。

文献[52]基于参与因子和分散控制器参数设计的思想,设计出一种针对PSS控制器和附加控制器的协调控制方法。文献[53]在先对PSS控制器的参数进行了优化以便抑制本地模式的低频振荡,在此基础上,再对直流附加控制器的参数进行了优化以便抑制区间模式的低频振荡,仿真效果证明了该理论在南方电网的多馈入交直流互联系统的可行性。

4.3 附加控制器与灵活交流输电系统的协调控制

文献[54]提出了一种基于广域测量系统的灵活交流输电系统(FACTS)与HVDC鲁棒协调控制策略。具体是先通过选择合适的广域控制信号,结合HVDC附加控制器和FACTS广域控制器的控制功能,再通过采用 H_2/H_∞ 控制理论的多目标综合策略设计出具有一定鲁棒性的附加控制器和FACTS

广域控制器,仿真验证了该理论的正确性。

1) 附加控制器与静止无功补偿器协调控制

文献[55]基于状态反馈精确线性化和最优变目标控制理论推导出了能够协调静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和直流附加控制器的控制策略,并且设计出相应的控制器,对单机无穷大系统和3机2区域系统进行了仿真,结果表明该控制策略能够实现SVC与附加控制器的多目标协调控制。

文献[56]基于微分几何理论与变结构控制理论,先通过建立交直流互联系统的数学模型,再利用精确线性化控制理论以及设计出相应的滑模控制器,由于该套协调控制策略考虑了SVC和附加控制器的非线性特性,故仿真结果表明该套策略能够较好地抑制区间低频振荡,提高交直流互联系统的暂态稳定性。

2) 附加控制器与可控串联补偿器的协调控制

文献[39]在交直流互联系统中加装了可控串联补偿器(thyristor controlled series compensator, TCSC),所以首先推导出含TCSC的交直流互联系统的模型,然后将广义哈密顿系统控制方法引入到TCSC与直流附加控制器的协调控制中,仿真验证了该套协调控制策略比只有附加控制器的抑制区间低频振荡的效果要好。

5 结 语

虽然最新的《电力系统安全稳定控制导则》在预防性控制和第2道防线上增加了直流系统参与电网稳定与控制的功能,并且对直流附加控制在电力系统安全3道防御体系中发挥的具体作用、影响及其在电网安全防御体系中定位有明确而清晰的阐述,但是直流附加控制器目前的实际应用还是以欧美等发达国家应用案例较多。国内运行的直流输电工程虽然大部分都具有直流调制功能,但除了个别直流工程有实际使用之外,其余大部分都处于闲置状态,因此比较缺乏直流调制工程实践经验^[57]。

考虑中国目前的电网结构以及未来的规划,西南水电已经形成多条直流输电线路与交流线路的混合对外输电系统,这客观上要求利用附加控制器来解决交流输电线路的低频振荡和故障过负荷问题;青藏直流输电系统也需要附加控制器来解决两端电

网的频率稳定问题,华东多馈入系统更需要附加控制器来改善受端电网的电压稳定问题;西北风电的外送计划还是需要附加控制器的功率/频率调制功能来抑制风电波动对送端系统频率稳定的影响。

中国电力按照西电东送、南北互供、全国联网的发展方针特别是近年来兴建了一批特高压直流输电工程,预计到2020年将会有超过20条超特高压直流线路投入投运,届时中国电网将成为世界上规模最大、电网最复杂的超特高压交直流互联输电系统。而随着交直流互联的电网规模逐年扩大,这客观上也要求直流系统能够在电力系统的稳定与控制中发挥更大的作用。积极开发和挖掘直流附加控制器的功能必然能够在维护交直流互联系统的稳定控制方面发挥巨大的作用,所以直流附加控制器的应用前景十分广阔。

参考文献

- [1] Prabha Kwder. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 347 - 348.
- [2] 宫改花. 高压直流输电系统控制策略的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [3] 陈汉雄. 高压直流输电与交直流混合系统的模糊控制及协调控制[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [4] 洪元鑫. 基于紧急功率支援的HVDC技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [5] 刘红超, 李兴源. 基于PRONY辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54 - 57.
- [6] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5 - 9.
- [7] 荆勇, 洪潮, 杨晋柏, 等. 直流调制抑制南方电网区域功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 53 - 56.
- [8] Zheng Han chu, Chen Shousun, Ni Yixin, et al. A Study of Multi-terminal DC Modulation Control[C]. IEE International Conference on Advances in Power System Control, Hong Kong, China, 1991: 615 - 620.
- [9] 刘红超. 交-直流互联电力系统的非线性模态分析和柔性协调控制[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [10] 陈凌云. 高压直流输电系统中非线性控制策略的研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [11] 李兴源, 陈凌云, 颜泉, 等. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 16 - 19.

- [12] 刘小江, 刘天琪, 刘群英. 降低 HVDC 逆变器无功损耗的非线性附加控制[J]. 继电器, 2005, 33(7): 6-9.
- [13] 陈凌云, 李兴源, 刘红超, 等. 高压直流输电系统非线性变结构控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 6-9.
- [14] 刘小江. 多馈入直流系统非线性变结构控制的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [15] 谢云秀, 王奔, 赵世峰. 关于交直流并列输电系统的控制策略研究[J]. 电气开关, 2006, 12(3): 12-14.
- [16] 谢云秀. 高压直流输电系统中换流器的非线性变结构控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [17] 靳岳超, 梁小冰, 孙会洁. 交直流互联系统非线性自适应控制规律设计[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 46-49.
- [18] 靳岳超. 交直流互联系统的非线性自适应直流附加控制器设计[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
- [19] 朱浩骏, 兰洲, 蔡泽祥, 等. 交直流互联系统鲁棒自适应直流功率调制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 21-26.
- [20] Marios M P, Petros A I. A Robust Adaptive Nonlinear Control Design [C]. American Control Conference, San Francisco, USA, 1993: 1365-1369.
- [21] 陈干平, 秦翼鸿, 徐国禹. 交直流并联输电系统自校正控制[J]. 重庆大学学报, 1991, 14(1): 16-21.
- [22] 王茂海, 孙元章, 宋永华. 基于反步法的多馈入直流输电系统调制控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 7-11.
- [23] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [24] 刘高原, 王杰. 交直流联合输电系统的鲁棒稳定控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 23-28.
- [25] 刘高原. 鲁棒稳定控制方法在交直流联合输电系统中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [26] 杜晟. 高压直流输电鲁棒控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [27] 蔡超豪, 高志达. 高压直流输电系统的 H_2/H_∞ 附加控制器设计[J]. 广东电力, 2005, 12(18): 30-33.
- [28] 蔡超豪. HVDC 的非线性 H_∞ 控制[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 38-40.
- [29] 李明, 梁小冰, 程丽. 高压直流输电系统的鲁棒非线性控制规律的设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 19-21.
- [30] 杨帆, 陈陈, 王西田, 等. 基于李雅普诺夫函数的直流附加控制器设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 14-17.
- [31] Cai Hongzhi, Qu Zhihua, Gan Deqiang. A Nonlinear Robust HVDC Control for a Parallel AC/DC Power System[J]. Computers and Electrical Engineering, 2003, 29(1): 135-150.
- [32] 许秀芳, 李兴源, 颜泉, 等. 改善系统暂态稳定性的 HVDC 模糊神经控制器[J]. 继电器, 2004, 32(11): 16-19.
- [33] 陈汉雄, 刘天琪. HVDC 系统中换流站的辅助模糊控制[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 5-8.
- [34] 邵震霞, 李兴源. HVDC 紧急功率支援自适应模糊控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 10(1): 1-4.
- [35] 丁一. 高压直流输电系统控制的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [36] 许秀芳. 高压直流输电系统中智能控制理论的应用[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [37] 房大中, 杨晓东, 宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 23-27.
- [38] Shi Fang, Wang Jie. The HVDC Supplementary Control for AC/DC Interconnected Power Grid Based on Hamilton Energy Function Theory [J]. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2014, 20(4): 15-21.
- [39] 石访. Hamilton 能量函数方法研究及其在电力系统稳定控制中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [40] 徐光虎, 孙衢, 陈陈. HVDC 模糊协调阻尼控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 18-23.
- [41] 查中魁. 基于多指标非线性控制理论的高压直流输电控制策略研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [42] 兰洲, 朱浩骏, 甘德强, 等. 基于惯量中心动态信号的交直流互联系统稳定控制[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 14-18.
- [43] 鲜艳霞. 最优变目标协调控制策略在交直流混合系统中的应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [44] 朱浩骏, 蔡泽祥, 刘皓明, 等. 多馈入交直流输电系统的模糊控制器协调优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 7-13.
- [45] 赵珊珊. PSS 与直流调制协调作用抑制低频振荡的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [46] 周艳伟. 电力系统稳定器和直流输电控制系统的交互作用对低频振荡抑制效果的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [47] 马燕峰. 交直流混合电力系统低频振荡协调稳定控制[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.
- [48] 马燕峰, 赵书强, 魏清. 基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 75-78.
- [49] 陈实, 李兴源, 赵睿, 等. 基于控制敏感因子的 PSS 和直流附加控制的协调阻尼控制[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3577-3583.

(下转第 49 页)

间上多根相交或不相交的避雷线或耐受雷击较强的导体联合保护,构建一种具有层次结构的防雷方案,并在工程设计中推荐采用三维建模进行校验。

所提出的相关方法解决了±1100 kV换流站直流场的防雷设计问题,有利于±1100 kV的顺利推进。

参考文献

[1] 陈锡磊,周浩,王东举,等. ±1100 kV 特高压直流换流站绝缘配合关键问题研究[J]. 高电压技术,2013,39(12):3015-3021.

[2] 聂定珍,马为民,余世峰,等. ±1000 kV/±1100 kV 特高压直流输电系统换流站的绝缘配合(英文)[J]. 高电压技术,2012(12):3156-3160.

[3] 姬大潜,刘泽洪,张进,等. ±1100kV 特高压直流输电换流站内深度限制过电压水平研究[J]. 电网技术,2012,36(10):55-60.

[4] 朱家骥. 对中国1100 kV 电网过电压及绝缘水平的建议[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会过电压及绝缘配合学组2006年学术年会,2006:20-23.

[5] 周沛洪,何慧雯,戴敏,等. ±1100 kV 直流换流站避雷器布置、参数和设备绝缘水平的选择[J]. 高电压技术,2014,40(9):2871-2884.

[6] 胡军,李伟,何金良,等. ±800 kV 特高压直流开关场内避雷线的参数选择[J]. 高电压技术,2010,36(1):136-143.

[7] 张翠霞,葛栋,殷禹. 直流输电系统的防雷保护[J]. 高电压技术,2008,34(10):2070-2074.

[8] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations: IEEE Standard 998-2012[S] 2012.

[9] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:

GB/T 50064-2014[S] 2014.

[10] 建筑物防雷设计规范:GB 50057-2010[S] 2010.

[11] 曾嵘,何金良,陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(二):分析方法[J]. 高电压技术,2009,35(12):2910-2916.

[12] C. F. Wagner, G. D. McCann, G. L. MacLane, Jr. Shielding of Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 60(4):318-328.

[13] 张桦,陈涛. 电气几何模型雷电击距分析研究[C]. 中国电机工程学会高电压专委会学术年会,2007.

[14] 万启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术,2012,38(10):2499-2505.

[15] 钱冠军. 下行雷闪屏蔽问题的研究及其在输电线路中的应用[D]. 武汉:华中理工大学,1998.

[16] 曾嵘,周旋,王泽众,等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高电压技术,2015,41(1):1-13.

[17] H E Jinliang, Zhang Xuwei, Dong Lin, et al. Fractal Model of Lightning Channel for Simulating Lightning Strikes to Transmission Lines[J]. Science in China, Series E, Technological Sciences, 2009, 52(11):3135-3141.

[18] 何金良,董林,曾嵘,等. ±800 kV 特高压直流开关场内避雷线间距分析[J]. 高电压技术,2010,36(1):19-25.

作者简介:

王强(1965),硕士、教授级高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作;

包维瀚(1989),工学硕士、工程师,从事换流站绝缘配合与防雷接地设计工作。

(收稿日期:2018-05-14)

(上接第43页)

[50] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 交直流电力系统PSS和直流附加控制的协调[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):53-57.

[51] 孙凌,李兴源,李宽,等. 交直流并联电力系统PSS和直流附加控制器协调优化设计[J]. 华东电力,2013,41(9):1835-1839.

[52] 唐峰,赵登福,沈赞坝. 交直流电力系统中附加控制器与稳定器的协调设计[J]. 西安交通大学学报,1993,27(1):41-48.

[53] 毛晓明,张尧,管霖,等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(20):55-59.

[54] Li Yong, Rehtanz C, Rüberg S, et al. Wide-area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Inter-area Oscillations

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1096-1105.

[55] 杨波. HVDC与SVC非线性协调控制的研究[D]. 成都:四川大学,2006.

[56] 温苾芳. SVC与HVDC的非线性变结构协调控制的研究[D]. 成都:西南交通大学,2010.

[57] 郭小江,马世英,卜广全,等. 直流系统参与电网稳定控制应用现状及在安全防御体系中的功能定位探讨[J]. 电网技术,2012,36(8):116-123.

作者简介:

王磊(1989) 硕士研究生,研究方向为高压直流输电;
胡永银(1989) 硕士研究生,研究方向为电力系统高压直流输电;

张珂(1990) 硕士研究生,研究方向为配电网自动化。

(收稿日期:2018-01-15)