

提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器

房大中, 杨晓东, 宋文南
(天津大学自动化学院, 天津市 300072)

摘要: 提出一种附加在高压直流(HVDC)系统上的辅助型模糊逻辑控制器以提高交直流互联电力系统稳定性。在控制器的设计中应用能量函数法,通过增大振荡的减速能量来提高系统的稳定性水平。借助于 HVDC 线路的快速控制能力,采用模糊规则平滑地调整 HVDC 输送的功率,并使用自适应控制技术以提高控制器的稳定性。在 4 机和 8 机交直流电力系统上的仿真结果表明,该控制器在平抑系统小信号振荡的同时也可在一定程度上改进系统的暂态稳定性。

关键词: 输电系统; HVDC; 模糊逻辑控制; 小信号稳定; 暂态稳定性; 联络线振荡

中图分类号: TM743; TP18

0 引言

电力系统高压直流(HVDC)输电线经常与超高压交流输电线并联运行,形成长距离大功率输电“走廊”。对上述网络结构,附加在 HVDC 上的辅助控制器可用来平抑区域 A 与区域 B 之间的功率振荡,提高系统的稳定水平^[1]。在常规 HVDC 辅助控制器设计中需要使用极点配置技术,要对系统进行特征值和特征向量分析。一方面,由于大规模电力系统特征值分析还存在难以克服的困难;另一方面,也由于这种控制器的效果依赖于系统的结构和工作点,因而这种技术在阻尼大系统联络线功率振荡上的应用受到了一定的限制。

本文提出一种辅助控制器的设计思想。该控制器可附加在 HVDC 和 FACTS 器件上。控制器的信号取自交流输电线,用于 HVDC 控制,其目的是有效地抑制联络线上的区域模式功率振荡^[1]。本文主要介绍新型控制器的基本原理及其实现的有关技术问题,并用 IEEE 4 机^[1]和中国电力科学研究院 8 机交直流电力系统上的仿真结果,说明了新型辅助控制器思想的正确性和本文提出的控制策略的有效性。

1 交直流混合联络线功率振荡的特征

交直流混合联络线电力系统如图 1 所示。

区域 A 和区域 B 之间的机电暂态过程可由式(1)所示的非线性微分方程描述^[2]:

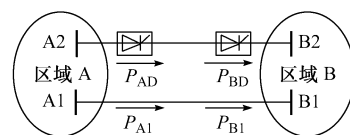


图 1 交直流混合联络线电力系统
Fig. 1 Two-area power system with AC and DC tie lines

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{AB} = \frac{1}{M_A}(P_{A0} - P_{AD} - P_{A1}) - \frac{1}{M_B}(P_{B0} + P_{BD} + P_{A1}) \\ \dot{\delta}_{AB} = \omega_{AB} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω_{AB} 和 δ_{AB} 分别为区域 A 和区域 B 两惯性中心(COI)之间的角转速差和角度差; P_{A0} 为区域 A 内所有发电机发出的有功功率减去负荷和网络损耗后的有功功率; P_{B0} 为区域 B 内所有发电机发出的有功功率减去负荷和网络(包括交流联络线)损耗后的有功功率; P_{AD} , P_{BD} 和 P_{A1} 分别为图 1 所示的有功功率; M_A 和 M_B 为区域 A 和区域 B 惯性中心(COI)的惯性常数^[3]。

若图 1 所示的电力系统发生了区域模式的功率振荡,则 ω_{AB} 和 δ_{AB} 的变化可反映出其振荡的特征。依据 ω_{AB} 和 δ_{AB} 的变化,每一个振荡周期可分为 4 个阶段,即阶段 1 反向减速($\dot{\omega}_{AB} > 0$ 和 $\omega_{AB} < 0$)、阶段 2 正向加速($\dot{\omega}_{AB} > 0$ 和 $\omega_{AB} > 0$)、阶段 3 正向减速($\dot{\omega}_{AB} < 0$ 和 $\omega_{AB} > 0$)和阶段 4 反向加速($\dot{\omega}_{AB} < 0$ 和 $\omega_{AB} < 0$)。为了说明上述联络线功率振荡的 4 个阶段,我们对 IEEE 4 机 11 母线交直流混合联络线电力系统^[1]进行了故障后仿真,系统结线如图 2 所示。故障条件为 6 号母线上发生三相短路,0.15 s 后清除。仿真中发电机采用经典模型,结果示于图 3。由于仿真中不

包括阻尼,图3所示曲线呈等幅振荡的特征。图3中所示时段 $a \rightarrow b, b \rightarrow c, c \rightarrow d$ 和 $d \rightarrow e$ 分别表示反向减速、正向加速、正向减速和反向加速4个阶段。同时也注意到系统在时刻 b 和 d 有 $\omega_{AB} = 0$; 在时刻 a 和 e , ω_{AB} 获得负的极大值(记作 ω_{ABmin}); 在时刻 c , ω_{AB} 获得正的极大值(记作 ω_{ABmax})。

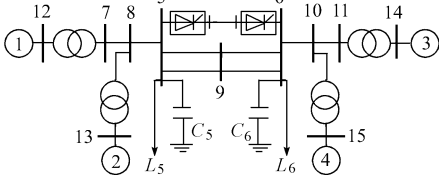
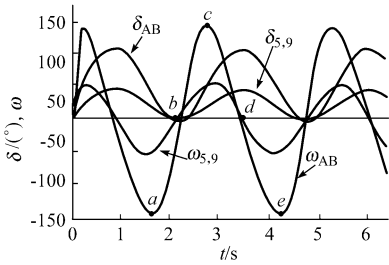


图2 IEEE 4机11母线交直流混合联络线电力系统
Fig. 2 The IEEE 4-generator 11-bus AC/DC system



图中 ω 以每秒的角度计算

图3 无阻尼控制时的角度和转速摇摆曲线
Fig. 3 Swing curves of angles and speeds without damping control

考虑零阻尼情况,假定 $(\delta_{AB0}, \omega_{AB0} = 0)$ 对应系统稳定平衡点且 $\delta_{ABa} = \delta_{ABc} = \delta_{ABe} = \delta_{AB0}$, 式(1)两边乘以 $d\delta_{AB}$ 并做定积分,可得:

$$\frac{1}{2}\omega_{AB}^2 - \int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{AB}} \left[\frac{1}{M_A} (P_{A0} - P_{AD} - P_{A1}) - \frac{1}{M_B} (P_{B0} + P_{BD} + P_{A1}) \right] d\delta_{AB} = \text{const} \quad (2)$$

考虑零阻尼系统,容易确定上式的积分常数为:

$$\text{const} = \frac{1}{2}\omega_{ABmin}^2 = \frac{1}{2}\omega_{ABmax}^2 \quad (3)$$

因而对零阻尼系统有 $\omega_{ABmax} = -\omega_{ABmin}$ 。若定义式(2)左边第1项和第2项为联络线振荡的动能和势能,式(2)、式(3)反映了零阻尼系统在联络线振荡中保持能量守恒性。

2 Bang-bang 控制构想

基于联络线振荡的上述物理特征及 HVDC 可以进行快速功率控制的优势,可以应用 bang-bang 控制策略阐述本文的控制思想:在阶段1将 HVDC 有功潮流调整为 $P_{AD} - \Delta P_{AD}$ ($\Delta P_{AD} > 0$, 送端) 和 $P_{BD} - \Delta P_{BD}$ ($\Delta P_{BD} > 0$, 受端),在阶段3将 HVDC 有功潮流调整为 $P_{AD} + \Delta P_{AD}$ (送端) 和 $P_{BD} + \Delta P_{BD}$

(受端),在阶段2和阶段4保持 HVDC 功率不变。令时刻 a 联络线振荡的总能量为 $\omega_{ABmin}^2/2$, 则有:

$$- \int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{AB}} \left[\frac{1}{M_A} (P_{A0} - P_{AD} - P_{A1}) - \frac{1}{M_B} (P_{B0} + P_{BD} + P_{A1}) \right] d\delta_{AB} = \frac{1}{2}\omega_{ABmin}^2 - \int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{ABb}} \left[\frac{1}{M_A} \Delta P_{AD} + \frac{1}{M_B} \Delta P_{BD} \right] d\delta_{AB} \quad (4)$$

式(4)说明从时刻 a 到时刻 b 联络线振荡的总能量(势能加动能)减少 $\int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{ABb}} \left(\frac{1}{M_A} \Delta P_{AD} + \frac{1}{M_B} \Delta P_{BD} \right) d\delta_{AB}$ 。同样也可以说明从时刻 c 到时刻 d 联络线振荡的总能量减少了 $\int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{ABd}} \left(\frac{1}{M_A} \Delta P_{AD} + \frac{1}{M_B} \Delta P_{BD} \right) d\delta_{AB}$ 。根据假定,因为 $\delta_{ABa} = \delta_{ABc} = \delta_{ABe} = \delta_{AB0}$, 所以在加了 bang-bang 控制的1个振荡周期后系统的总能量减少了 $\frac{1}{2} \int_0^T \left(\frac{1}{M_A} \Delta P_{AD} + \frac{1}{M_B} \Delta P_{BD} \right) dt$ 。如果 ΔP_{AD} 的取值很大, bang-bang 控制造成的 HVDC 输送功率的剧烈变化会对区域 A 和区域 B 中 HVDC 换流器附近的发电机转轴造成巨大的冲击,缩短转轴的使用寿命,因此在设计控制方案时要设法使 HVDC 传输的功率平滑地变化;另一方面,如果 ΔP_{AD} 取固定值,在振荡逐渐平息过程中, ΔP_{AD} 有可能大于交流联络线的功率振荡幅度,这反而会造成联络线上的功率波动。因此 ΔP_{AD} 的值应该根据振荡大小的变化动态地进行调整。本文将应用自适应模糊逻辑控制技术来处理这些问题。

3 控制信号

考虑到在振荡的阶段1和阶段2中 $\delta_{AB} < \delta_{AB0}$, 在阶段3和阶段4中 $\delta_{AB} > \delta_{AB0}$, 所以在控制过程中可以依据 δ_{AB} 和 ω_{AB} 的变化来确定振荡的4个阶段。由于振荡的功率要通过 AC/DC 联络线传送,所以图1中角度 δ_{A1B1} 的变化应与角度 δ_{AB} 的变化同一模式,即它们同步地达到最大值和最小值。这一点已在4机系统^[1]和8机系统上得到验证。图3所示 $\delta_{5,9}$ 是图2所示4机系统5号和9号母线之间的相角差, $\omega_{5,9}$ 是其对时间的一阶导数,通过与联络线两边 COI 角度差 δ_{AB} 和角速差 ω_{AB} 比较可验证上述结论。鉴于 δ_{A1B1} 角的可测量性,本文以 δ_{A1B1} 角代替 δ_{AB} 角作为控制信号。

4 HVDC 控制器的设计

本文提出的稳定性模糊逻辑自适应控制器 (SFLAC) 的结构如图4所示。图4中, $\delta, \delta_0, P_{DC0}$ 和 ΔP 分别代表前面提到的 $\delta_{A1B1}, \delta_{AB0}, P_{AD}$ 和 ΔP_{AD} 。相角 δ 是输入信号,其值可通过文献[3]介绍的技术来

测量。随着新技术的发展,精确的同步时钟测相单元已能够实现这一点^[4]。测量误差或系统状况的突然变化(比如投入线路或切除负荷)都可能在 $\Delta\delta$ 与 $\Delta\omega$ 信号中产生高频分量,干扰 SFLAC 的正常工作,因此要使用 2 个低通滤波器来滤除其中的高频分量。信号 δ_0 的初值采用扰动前 δ 的值,当 $\Delta\hat{\omega}$ 达到其最大值或最小值时,采用 $\Delta\hat{\delta}$ 来修正 δ_0 的值,把此时 δ 的值作为 δ_0 。通过对 δ_0 的自适应修正可以使 SFLAC 自动地控制系统,使其稳定于故障后系统的工作点。

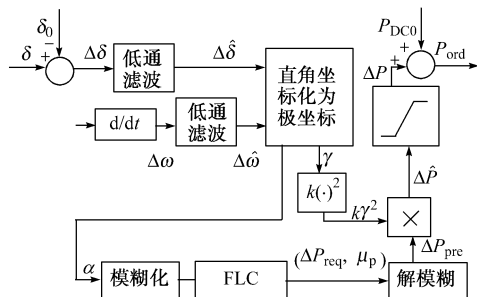


图 4 SFLAC 的配置
Fig. 4 Configuration of SFLAC

与常规的控制方法相比,模糊逻辑方法的优点在于它并不需要输入量和系统参数的精确数值^[5,6],可以使用模糊逻辑方法来平滑地调节 HVDC 的线路传输功率。使用式(5)、式(6)将滤波器的输出信号 $\Delta\hat{\delta}$ 和 $\Delta\hat{\omega}$ 转化为一对极坐标系变量 α 和 γ ,在图 5 所示的相平面中研究振荡转速差和功角差的变化。 α 角表示振荡当前所处的阶段,而 γ^2 用以衡量振荡的严重程度。

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta\hat{\omega}}{\Delta\hat{\delta}} \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{\Delta\hat{\delta}^2 + \Delta\hat{\omega}^2} \quad (6)$$

图 5 中的第 3、第 2、第 1 和第 4 象限分别对应振荡的第 1、第 2、第 3 和第 4 阶段。由于角度 α 所在的象限可表示振荡当前所处的阶段,故把 α 作为模糊逻辑控制器(FLC)的输入。又因为 bang-bang 控制使 HVDC 线路传输功率在最大值 $P_0 + \Delta P$ 和最小值 $P_0 - \Delta P$ 之间变化,所以考虑用 2 个变量 $\Delta P_{\max}$ 和 $\Delta P_{\min}$ 作为 FLC 的输出。与 $\Delta P_{\max}$ 和 $\Delta P_{\min}$ 相对应,可构造出扇区 A 和扇区 B,其涵盖及交叉重叠的范围如图 5 所示。表 1 中的简单模糊规则给出了模糊逻辑控制器的输入输出关系。

表 1 模糊规则
Table 1 Fuzzy rules

扇区 A	扇区 B
$\Delta P_{\max}$	$\Delta P_{\min}$

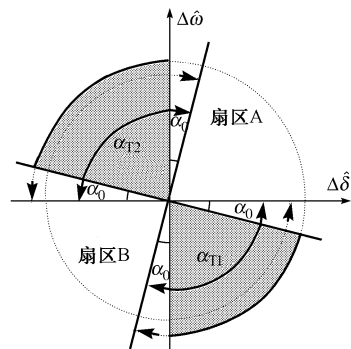


图 5 控制策略相平面
Fig. 5 Phase plane for control strategy

FLC 应用图 6 所示的隶属函数和表 1 所示模糊规则来对 α 进行处理,产生输出 ΔP_{req} 。输出的模糊集 $\{(\Delta P_{\max}, \mu_{\text{pmax}}), (\Delta P_{\min}, \mu_{\text{pmin}})\}$ 记为 $\{\Delta P_{\text{req}}, \mu_p\}$,其中 μ_{pmax} 和 μ_{pmin} 是图 6 所示的隶属函数,它们表示了 α 对变量 $\Delta P_{\max}$ 和 $\Delta P_{\min}$ 的隶属度。为避免 HVDC 传输的功率在短时间内发生剧变,当 α 穿越图 5 相平面中各坐标轴时,应使 FLC 的输出较为平滑地变化,因此对图 5 中扇区 A 和扇区 B 重叠区域(α_{T1} 和 α_{T2})的隶属函数进行了特殊设计。解模糊后的输出量 ΔP_{pre} 通过式(7)来计算:

$$\Delta P_{\text{pre}} = \mu_{\max}(\alpha)\Delta P_{\max} + \mu_{\min}(\alpha)\Delta P_{\min} \quad (7)$$

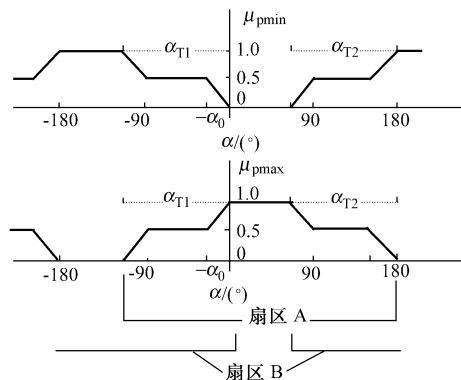


图 6 角度的隶属函数
Fig. 6 Angular membership functions

例如,假设 α 属于扇形区 A 且其隶属度为 0.4,根据图 6 的隶属函数可得出输出模糊集为 $\{(\Delta P_{\max}, 0.4)$ 和 $(\Delta P_{\min}, 0.6)\}$,令 $\Delta P_{\max} = \Delta P_0$, $\Delta P_{\min} = -\Delta P_0$ (ΔP_0 是 HVDC 功率的增量),那么

$$\Delta P_{\text{pre}} = (0.4 - 0.6)\Delta P_0 \quad (8)$$

当振荡较大时, $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 的值也较大;当振荡逐渐被抑制时, $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 的值会变小。由式(6)可知 γ^2 的值可反映 $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 的幅度,因此可以使用 γ^2 来自适应地调整 HVDC 功率指令的增量,从而动态地调整 HVDC 传输的功率增量大小。在 SFLAC 的设

计中,还需要选取合适的常量参数 k (见图4),用 k 与 γ^2 的乘积来实现对 ΔP_{pre} 的幅度调整。对于大振荡, ΔP_{pre} 虽然会被大幅度地放大,但限值环节会对其加以限制。随着振荡的逐渐平息, ΔP_{pre} 会不断减小直至趋于0。 P_{DC0} 是由交直流系统控制中心确定的直流潮流,它与 ΔP 之和 P_{ord} 作为SFLAC输出的功率指令信号输入到HVDC主控制中。

5 仿真验证

本文仿真验证在IEEE 4机11母线AC/DC系统^[1]和中国电力科学研究院8机36母线AC/DC测试系统上进行,网络结构分别如图2和图7所示。4机系统的网络及HVDC参数可参考文献^[1]。图8所示为采用SFLAC作为HVDC辅助控制器后,4机系统6-9线路送端发生三相短路,0.25 s后切除6-9线路(清除故障)的仿真结果,其中曲线 $\delta_{5,9}$ 表示5号和9号母线的相角差, δ_0 为SFLAC中的自适应参数变化曲线。通过与图3曲线 $\delta_{5,9}$ 比较可以看出,故障后区域模式振荡被迅速镇定下来,而 δ_0 和 ΔP_{pre} 的自适应调整方法亦是有效的。

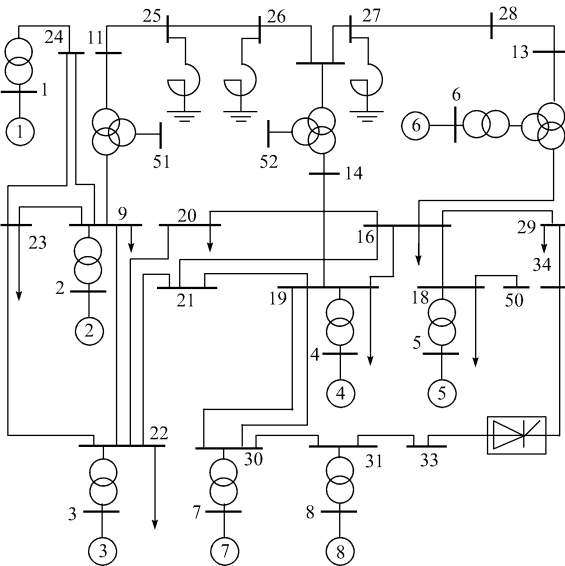


图7 中国电力科学研究院8机36母线AC/DC系统
Fig. 7 The 8-generator 36-bus AC/DC test system in EPRI of China

在8机系统仿真验证中,发电机采用经典模型,负荷采用恒阻抗模型。网络及HVDC参数可参考中国电力科学研究院PSASP电力系统分析软件使用说明。发电机7和8输出的有功功率为530 MW,分配到交流和直流输电线路上的潮流分别为225 MW和300 MW。为了测试SFLAC抑制振荡的能力,假设在30号母线处发生三相短路,故障清除时间为0.15 s,故障后系统没有线路切除。仿真结果

如图9所示,图中曲线 $\delta_{30,19}$ 表示30号和19号母线的相角差。测试结果表明SFLAC控制器在2 s内就可有效地抑制故障引起的剧烈功率振荡。

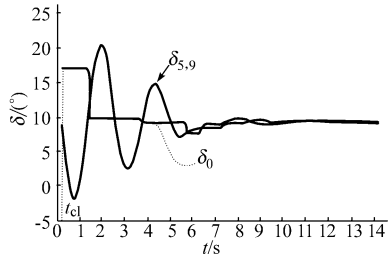


图8 4机系统故障后线路相角差 $\delta_{5,9}$ 和SFLAC控制中使用的 δ_0 变化曲线
Fig. 8 Variations of AC line angle $\delta_{5,9}$ and the angle δ_0 used in SFLAC for the fault in the 4-generator system

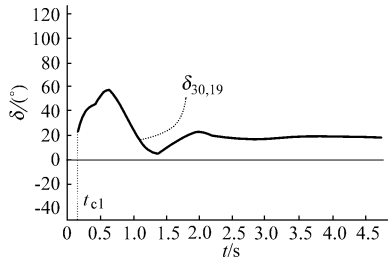


图9 8机系统故障后线路相角差 $\delta_{30,19}$ 的变化曲线
Fig. 9 Variation of line angle $\delta_{30,19}$ for the fault in the 8-generator system

与常规的HVDC附加控制器相比,SFLAC有以下优点:①SFLAC对抑制故障后区域间模式振荡十分有效;②SFLAC是自适应控制器,它对不同频率的区域间模式振荡都有效;③在SFLAC设计中不需要对特征值和特征向量进行分析,从而避开了常规HVDC附加控制器设计中对大系统进行特征值分析的难题。

为检验SFLAC提高暂态稳定性的作用,进行了以下仿真:对于4机测试系统,假定6号母线处发生三相短路,故障后系统不切除线路(3 ϕ -SC-6-0);对于8机测试系统,假定在30号母线处发生三相短路,并切除30-19双回线中的一回(3 ϕ -SC-30-(1,30-19))。表2中给出的仿真结果表明,对于AC/DC联络线附近的严重扰动,SFLAC能增强系统的暂态稳定性。

表2 有/无SFLAC时临界故障清除时间的比较
Table 2 Comparison of critical fault clearing time with and without SPLAC

故障类型	无SFLAC时的 t_{cl}	有SFLAC时的 t_{cl}
3 ϕ -SC-6-0	0.32~0.33	0.37~0.38
3 ϕ -SC-30-(1,30-19)	0.17~0.18	0.26~0.27

6 结论

本文提出一种新型的 HVDC 控制策略及稳定性模糊逻辑自适应控制器(SFLAC)的构想。借助于 HVDC 线路快速控制传输功率的能力,提供平抑联络线振荡的阻尼功率,使系统自适应地稳定于故障后平衡点。SFLAC 中采用了模糊逻辑技术使功率输送平滑化并防止联络线路上功率波动。在实际规模 AC/DC 电力系统上的仿真结果验证了 SFLAC 的有效性和鲁棒性。该控制器的优点是不受系统工作点影响,可同时提高系统小信号稳定性和暂态稳定性水平。在 FACTS 技术飞速发展的今天,SFLAC 为电力系统稳定性控制提供了新的手段。

参考文献

- 1 Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1993
- 2 Fang D Z, Chung T S, Zhang Yao, et al. Transient Stability Limit Conditions Analysis Using a Corrected Transient Energy Function. IEEE Trans on Power System, 2000, 15 (2): 804~

810

- 3 Missout G, Beland J, Beland G, et al. Dynamic Measurement of the Absolute Voltage Angle on Long Transmission Line. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(11): 4428~4434
- 4 Stanton S E, Slivinsky C, Martin K, et al. Application of Phasor Measurement and Partial Energy Analysis in Stabilizing Large Disturbances. IEEE Trans on Power System, 1995, 10 (1): 297~302
- 5 Jamshidi M, Vadiiee N, Ross T J. Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Application. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall Inc, 1993
- 6 Hiyama T, Miyazaki K, Satoh H. A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power System with Multi-mode Oscillations. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11 (1): 125~131

房大中(1946—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定性分析与安全控制。E-mail: Dzfang@eyou.com
 杨晓东(1979—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定性控制。E-mail: Yangxiaodong@eyou.com
 宋文南(1934—),男,教授,研究方向为电力系统分析。

A FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR THE HVDC SYSTEM TO ENHANCE STABILITY OF AC/DC POWER SYSTEM

Fang Dazhong, Yang Xiaodong, Song Wennan
 (Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: An auxiliary fuzzy logic controller installed in the HVDC system is developed to improve stability of interconnected AC/DC power systems. Applying the transient energy function method, the controller is designed to enhance stability by increasing the deceleration energy of oscillatory. Using the fast control capability of the HVDC link, a fuzzy rule is adopted to smooth the power transition. Also self-adaptive control techniques are incorporated into the strategy to ensure stability of the control action. Simulation results on the IEEE 4-generator and the 8-generator AC/DC power systems have shown that the controller presented can enhance both small signal stability and transient stability.

This project is supported by XJ Education Foundation of Chinese Electricity Education Foundation in 2000.

Key words: transmission system; HVDC; fuzzy logic control; small signal stability; transient stability; tie-line oscillation