

IPC 增强互联系统稳定性控制策略研究

刘修宽, 蒋维勇, 周苏荃, 王 祁, 柳 焯
(哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于相间功率控制器 IPC(Interphase Power Controller) 互联系统, 比较了保证电网互联的 IPC 同步策略。从暂态振荡能量函数角度分析了联络线功率振荡的机理, 提出通过调节联络线功率不断削减互联系统暂态振荡能量, 从而达到阻尼联络线振荡的 IPC 参数控制策略。设计了 IPC 自适应模糊控制器, 选择联络线两端电压相位差与联络线功率作为控制信号, 对增益系数进行自适应模糊调节。以 4 机双区域测试系统为例, 分多种情况进行了暂态时域数值仿真。仿真结果表明: 该控制器能够保证互联系统同步, 并有效阻尼联络线功率振荡, 联络线传输功率和关键节点电压等指标也可得到保证。

关键词: 互联电网; 相间功率控制器; 低频振荡; 柔性交流输电系统
中图分类号: TM 76; TM 713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)08-0027-05

0 引言

电力系统互联中存在许多效益型弱联网, 联络线交换功率所占比例较小, 在采用交流同步互联时, 系统同步运行难以保证。另外, 联络线易发生功率振荡, 即区域间模式的低频振荡, 这对系统的安全稳定运行十分不利, 必须采取有效措施进行抑制^[1-3]。

相间功率控制器 IPC (Interphase Power Controller) 对潮流的控制能力很强, 且具有故障隔离的特性, 因而将其用于系统交流互联具有一定优势^[4,5]。目前, 将 IPC 应用于大区电网互联的研究已经展开, IPC 本身不能向系统提供阻尼转矩以抑制联络线低频振荡, 基于 IPC 互联电网仍然可能发生联络线功率振荡, 这些都是在研究将 IPC 应用于电网交流互联时所遇到的需要解决的问题。

针对大型电力系统交流联网, 研究通过采集联络线的相关信号控制 IPC 参数, 分析 IPC 对电力系统暂态和动态稳定性能的影响, 具有理论和实践应用指导意义。

1 阻尼联络线振荡的 IPC 参数控制策略

对于图 1 所示基于 IPC 的互联电力系统, 设 ω_{AB} 和 δ_{AB} 分别为区域 A 和 B 两惯性中心(COI)之间的转速差和角度差。当两 COI 间发生摇摆引发区域模式振荡时, 可根据 ω_{AB} 的状态特征将一个周期的振荡划分为以下 4 个阶段:

- a. 反向加速, $\dot{\omega}_{AB} > 0$ 和 $\omega_{AB} > 0$;
- b. 反向减速, $\dot{\omega}_{AB} < 0$ 和 $\omega_{AB} > 0$;

- c. 正向加速, $\dot{\omega}_{AB} < 0$ 和 $\omega_{AB} < 0$;
- d. 正向减速, $\dot{\omega}_{AB} > 0$ 和 $\omega_{AB} < 0$ 。

图 2 给出了角度差 δ_{AB} (曲线 1)、转子角速度差 ω_{AB} (曲线 2)、联络线功率差 P_{AB} (曲线 3) 及 IPC 参数变化量 Δb_{IPC} (曲线 4) 之间的变化关系, 其中 $t_0 \sim t_1, t_1 \sim t_2, t_2 \sim t_3, t_3 \sim t_4$ 分别对应了振荡的上述 4 个阶段。在 t_3 时刻, 两侧系统转速差达最大值 ω_{ABmax} ; 在 t_1 时刻, 转速差达最小值 ω_{ABmin} ; 在 t_0, t_2, t_4 时刻两侧系统转速差为零。

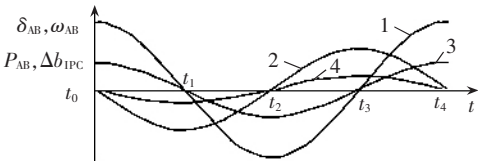


图 2 区域模式振荡中各状态变量关系摇摆曲线
Fig.2 State parameter swing curves in area mode oscillation

对区域模式低频振荡可以从暂态振荡能量的角度分析。根据区域振荡能量下降原理, 通过控制手段对联络线功率进行控制, 不断减小区域暂态振荡能量, 可以达到抑制联络线低频振荡的目的。

下面分析含 IPC 联络线功率振荡的机理, 并研究阻尼联络线振荡的 IPC 参数控制策略。对图 1 互联系统, 其机电暂态过程可用非线性微分方程描述:

$$\dot{\omega}_{AB} = \frac{1}{M_A} (P_{A0} - P_A) - \frac{1}{M_B} (P_{B0} + P_B) \quad (1)$$

$$\dot{\delta}_{AB} = \omega_{AB} \quad (2)$$

式中 P_{A0} 为区域 A 内所有发电机发出有功功率减去负荷和网损后的有功功率; P_{B0} 为区域 B 内所有发电机发出有功功率减去负荷和网络(包括联络线)损耗后的有功功率。

设系统零阻尼, $\delta_{AB} = \delta_{AB0}, \omega_{AB} = 0$ 为系统的稳定平衡点, 对式(1)作关于 $d\delta_{AB}$ 的定积分运算, 可得:

$$\frac{1}{2}\omega_{AB}^2 + \int_{\delta_{AB0}}^{\delta_{AB}} - \left[\frac{1}{M_A}(P_{A0} - P_A) - \frac{1}{M_B}(P_{B0} + P_B) \right] d\delta_{AB} = c \quad (3)$$

式中 c 为积分常数,即为区域间暂态振荡能量。

对于零阻尼系统,可确定积分常数为

$$c = \frac{1}{2}\omega_{ABmin}^2 = \frac{1}{2}\omega_{ABmax}^2 \quad (4)$$

式(3)左边两项分别具有动能和势能的形式,它反映了零阻尼系统联络线振荡过程中能量守恒,振荡摇摆就是暂态能量中动能和势能的消长过程。记系统动能函数为 $W_k(t)$,势能函数为 $W_p(t)$,振荡的不同阶段与能量的不同转化过程对应,如过程 **a** 中动能不断增大,势能则相应减小,其他阶段与之类似。区域暂态振荡能量的大小反映了系统振荡的程度,其大小可用发电机转子角速度最大或最小时的系统动能大小确定,此时,系统振荡势能全部转化为动能。势能函数为

$$W_p(t) = W_p(t_0) + \int_{\delta_{AB}(t_0)}^{\delta_{AB}(t)} - \left[\frac{1}{M_A}(P_{A0} - P_A) - \frac{1}{M_B}(P_{B0} + P_B) \right] d\delta_{AB} \quad (5)$$

由上面的分析可知,如果能借助控制手段使区域间暂态振荡能量的总量单调持续地消减,则区域振荡就会逐渐平息,使系统稳定。对上述无阻尼系统在 t_0 , t_2 和 t_4 时刻,区域间暂态振荡能量全部为势能并且大小相等,动能为零,若通过控制使系统的势能减小,即可达到减小暂态振荡能量的目的。

实施上述控制策略时要根据联络线提供的相关信息辨别出振荡的各个阶段,并且由于联络线传输功率对 IPC 参数变化十分敏感,IPC 参数控制量一定要适当^[6,7]。该控制策略能振荡联络线功率振荡,说明它可以增加互联系统的阻尼转矩,这是该控制策略的实质。为了增加互联系统的同步能力,要对 IPC 参数

进行控制。由于 IPC 增加系统同步转矩的控制和增加系统阻尼转矩的控制之间影响很小,因此同步控制和阻尼控制可以独立进行,然后进行叠加,但是若在同步控制和阻尼控制之间进行一定的协调,则控制过程会更加合理有效。

2 基于互联电网 IPC 自适应模糊控制器设计

电力系统是一个复杂的非线性系统,要建立其精确的数学模型往往比较困难,因而用传统的控制理论对电力系统的运行状态进行控制很难取得满意的效果,而模糊控制往往有效,本文 IPC 参数控制器即采用自适应模糊控制。

2.1 控制信号选择

在互联电网 IPC 参数控制系统中,IPC 控制需要实现 2 个功能:保持互联电网的同步运行和阻尼联络线功率振荡。同步控制一般选择联络线两端电压相位差 δ 作为控制信号;阻尼控制中,为了能够根据控制信号,通过控制策略辨识出振荡的各个阶段,适宜选择联络线输送功率作为控制信号。因此 IPC 自适应模糊控制器的输入量为联络线两端电压相位差 δ 与联络线功率 P ,它们分别反映两侧系统同步运行情况和联络线功率振荡的情况,通过它们可以实现控制器的基本功能。

2.2 模糊控制器构成

IPC 参数自适应模糊控制器的结构如图 3 所示。图中, $P(t)$ 为联络线传输的有功功率, $D_p(t)$ 和 $D_s(t)$ 分别为联络线功率偏差量及其导数。用 $D_p(k)$, $D_s(k)$ 表示对 $D_p(t)$ 和 $D_s(t)$ 的离散化结果。 Δb_{IPC} 为控制变化量,它由两部分组成,其中 $\Delta b'_{IPC}$ 与 $\Delta b''_{IPC}$ 分别为同步控制和阻尼控制导致的 IPC 导纳变化量。

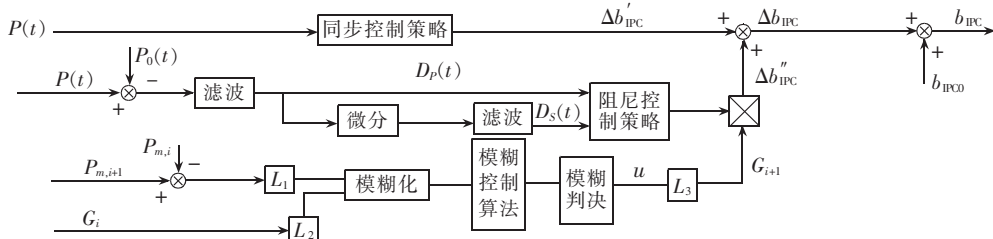


图 3 控制器结构图

Fig.3 Configuration of the controller

阻尼控制策略可以用图 4 和式(6)表述。

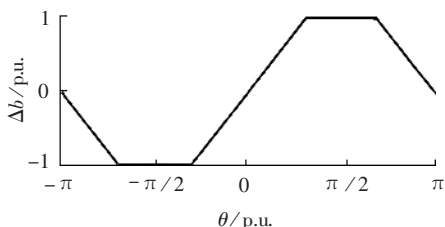


图 4 Δb 与 θ 的映射关系

Fig.4 The mapping function of Δb and θ

$$\theta(k) = \arctan \frac{-k_z D_s(k)}{D_p(k)}, \theta(k) \in [-\pi, \pi] \quad (6)$$

$$\Delta b''_{IPC} = G \cdot \Delta b \quad (7)$$

其中, $\theta(k)$ 表示 $D_p(k)$ 和 $D_s(k)$ 的相位关系。

当 $\theta(k) \in [0, \pi]$ 时,对应振荡的第 **a, b** 阶段;当 $\theta(k) \in [-\pi, 0]$ 时,对应振荡的第 **c, d** 阶段, K_z 是用于协调 $D_p(k)$ 和 $D_s(k)$ 幅值关系的比例系数。控制类似于 Bang-Bang 控制的控制决策:当 $\theta(k) \in [0, \pi]$ 时,增加 IPC 导纳, $\Delta b > 0$, 联络线传输功率增加;当

$\theta(k) \in [-\pi, 0]$ 时,减小 IPC 导纳, $\Delta b < 0$, 联络线传输功率减小。为了使 Δb 能平滑的变化,可以采用图 4 所示的函数关系,由 $\theta(k)$ 映射到 Δb , Δb 的符号和大小分别表示 IPC 导纳的调节方向和调节程度。为了保证 IPC 阻尼联络线振荡的鲁棒性能,需要设定一个增益系数 G ,其大小可以根据振荡的严重程度用动态模糊进行调节。

参考信号 $P_0(t)$ 的初值采用扰动前的联络线功率值,在控制过程中,可根据 $D_s(k)$ 过零时联络线的功率值更新,以保证控制器能工作在不同的稳定工作点。 b_{IPC0} 就是每个控制过程动作前的 IPC 导纳值。

2.3 增益系数的自适应模糊调节

增益系数要根据振荡的不同程度改变控制器的参数输出,从而使控制器的输出与振荡的程度相协调,控制器的鲁棒性能会比较好,可以适应不同工作状况的要求。增益系数的调节跟振荡的程度密切相关,在此用振荡幅值作为增益系数的控制量。在振荡周期中,每当 $D_s(k)$ 过零时, $D_p(k)$ 就处于波峰或者波谷,对应的 $\theta(k) = 0, -\pi$ 或 π , 控制器输出 IPC 导纳变化量阻尼部分的符号就会发生一次变化,在此时刻可对 G 进行调节。为了方便分析控制过程,先将 $D_s(k)$ 过零使得 $D_p(k)$ 值分别记为 $P_1, \dots, P_i, P_{i+1}, \dots$, 相应的增益系数分别为 $G_1, \dots, G_i, G_{i+1}, \dots$, 给定初值 G_1 , 就可以连同 P_1 和 P_2 一起用模糊控制单元求 G_2 。 G_i 的求取可以类推。

建立模糊规则是自适应模糊调节的第一步,控制规则来自人的实际经验,可表述如下:首先根据经验试探性给定一个初值 G_1 , 如果控制效果较为明显但振荡幅值仍然较大,可以保持或者适当增大 G , 如果振荡幅值没有明显减小,可以增加 G , 如果振荡幅值已经很小,则可以适当减小 G 。根据上面的叙述,可以制定如表 1 所示的模糊规则。在控制过程中用振荡幅值的变化量 $(P_i - P_{i+1})$ 表征振荡程度,并记为 ΔP_i 。

在图 3 中, L_1 和 L_2 是比例系数,它们分别将 G

和 ΔP_i 转化到各自的论域范围, 然后进行模糊处理,使原来的精确输入量变成模糊量。 ΔP_i 模糊词集采用如下格式: $\{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\}$ 。该格式自左向右,各量分别为负大、负中、负小、零、正小、正中和正大, ΔP_i 经尺度变换量化后得到的基本论域均为 $[-3, 3]$ 。 G 模糊词集采用如下格式: $\{ZR, PS, PM, PB\}$ 。 G 经尺度变换量化后得到的基本论域均为 $[0, 3]$ 。对于输入模糊集隶属函数选用连续高斯型函数,参数 δ_i 均取 1, x_i 取 $[-3, 3]$ 内的整数,实现输入量的模糊化。

最后要进行模糊推理和反模糊化以得到合适的输出量。为了充分利用模糊控制子集所提供的信息,在本文控制器中采用加权平均判决法,如式(8)所示:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i \mu_i(x_i)]}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x_i)} \tag{8}$$

式中 μ_i 是输出变量对模糊子集中各语言值的隶属度; x_i 是各语言值对应的量化值。

通过上式可以求得输出量的大小。由于控制器的初始增益系数要人为给定,并且它的给定对振荡的阻尼效果特别是开始时刻的阻尼效果影响很大。若初值给定太大,则当振荡幅度较小时,控制过程可能会给系统带来扰动;若初值给定太小,则控制器对大幅振荡开始时刻的阻尼效果又较差。因而初值的选择需要综合考虑。

3 基于可控 IPC 互联系统时域暂态仿真

为验证控制策略及 IPC 参数自适应模糊控制器的有效性,采用 4 机双区域测试系统进行时域仿真验证,4 机系统网络如图 5 所示,图中给出了其线路、负荷参数及发电机参数,未加说明的所有参数均为标么值,选择的基准值为 $S_B = 900 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_B = U_{av}$ 。

在仿真中,发电机采用简单三阶模型,并且设定其阻尼系数为零,励磁调节系统采用不计饱和的一惯性放大环节表示,负荷采用恒定阻抗模型。

首先给出不含 IPC、含不可控 IPC 且 IPC 工作于 $-25^\circ < \delta_{\text{IPC}} < 25^\circ$ 时的仿真结果,以方便比较。在仿真中,IPC 传输功率为 0.499 623,设定 IPC 初始工作于 $\delta_{\text{IPC}} = 0^\circ$, $b_{\text{IPC}} = 0.542\ 295$, 扰动为 7 节点发生 0.2 的功率波动,仿真结果如图 6 所示,它为 1 和 3 号发电机组角差 δ_{13} 变化曲线。

在图 6 中, (a) 是用普通联络线互联时的发电机

表 1 模糊控制状态表

Tab.1 The fuzzy control rules

u	ΔP_i						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
G_i	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS
	PM	PB	PB	PB	PM	PS	PS
	PS	PB	PB	PM	PS	PS	ZR
	ZR	PM	PM	PM	PS	ZR	ZR

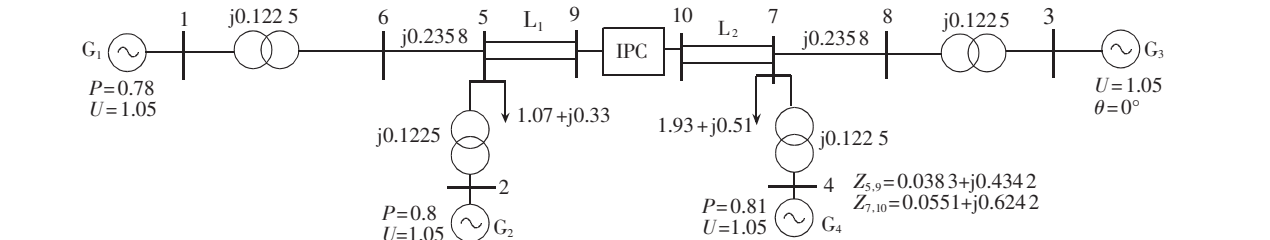


图 5 4 机双区域测试系统

Fig.5 A four-machine two-area test system

功率角变化曲线,(b)为装设了 IPC 且 IPC 初始工作于 $\delta_{IPC}=0^\circ$ 中时仿真结果。由结果可知,不含 IPC 互联系统联络线在无阻尼时会发生等幅振荡,装设 IPC 后,若 IPC 不加附加控制手段时是不能保证系统稳定运行的,一个小的扰动就可以使系统发生“爬坡”失稳,这是因为含 IPC 互联系统同步功率不足。

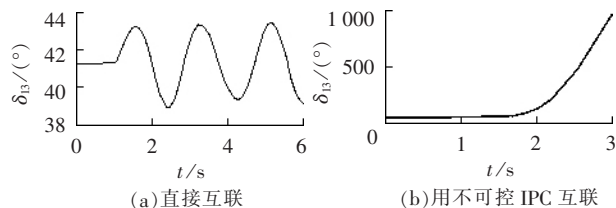


图6 不含控制器互联时仿真结果图

Fig.6 Simulation results of interconnection without controllable IPC

为保证系统的稳定运行,下面就根据控制策略分析,对 IPC 工作于 $-25^\circ < \delta_{IPC} < 25^\circ$ 并装设同步和阻尼自适应模糊控制器的情况进行仿真。仿真初值如下:联络线传输功率为 0.499 622 7,相应的 $b_{IPC}=0.542\ 295$, $\delta_{IPC}=0^\circ$;仿真假设扰动在第 1 s 发生,仿真结果如图 7 所示,分别给出了 1 和 3 号发电机功率角差、送端节点电压、受端节点电压以及 b_{IPC} 变化曲线图。图中虚线表示 IPC 仅进行同步控制,实线表示在同步控制的基础上追加了阻尼控制。模拟节点 7 发生 0.25 的有功功率功率波动。

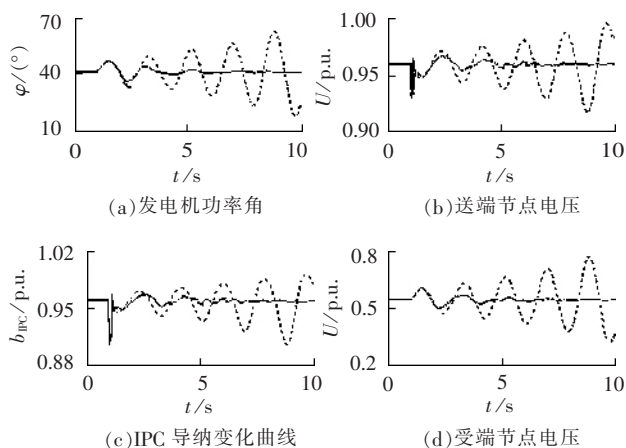


图7 扰动时仿真结果图

Fig.7 Simulation results of open circuit with light load

仿真结果表明,当 IPC 工作于 $-25^\circ < \delta < 25^\circ$ 时,仅对 IPC 进行同步控制时可以保证系统不发生“爬坡”失稳,但是会发生振荡从而导致互联系统的振荡失稳。若在同步控制的基础上追加阻尼控制,系统的振荡可有效平息,从而最终使系统稳定。IPC 参数控制可以达到抑制低频振荡的目的,说明暂态能量函数法的理论分析是正确的,由于 IPC 潮流控制能力强,在阻尼控制中,IPC 参数调节量很小就可以达到阻尼低频振荡的目的。通过该 IPC 参数模糊控制器,系统运行的其他指标如电压水平等均可以满足要求,而且阻尼控制的追加,减小了 IPC 的动作强度,有利于延长 IPC

元器件的寿命。另外,由仿真可知该控制器的鲁棒性很强,可以适应多种情况下系统的要求。

4 结论

本文比较了基于 IPC 互联系统同步功率增加的方法,从暂态振荡能量角度分析了互联系统联络线功率振荡的机理,提出通过调节联络线功率不断削减互联系统暂态振荡能量,从而达到阻尼联络线振荡的 IPC 参数控制策略。根据控制策略,设计 IPC 参数自适应模糊控制器,同时提供同步功率和阻尼联络线功率振荡,为简化控制过程,采用含 IPC 线路的相关信息作为控制变量。仿真结果表明:该控制器能够保证互联系统同步,并有效阻尼联络线功率振荡,联络线传输功率和关键节点电压等指标也可得到保证。

参考文献:

- [1] 樊福而. 大电网互联系统的频率与潮流问题[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 27-29.
FAN Fu-er. Frequency and power flow of interconnected large power system[J]. *Power System Technology*, 2000, 24(6): 27-29.
- [2] POURBEIK P, GIBBARD M J. Damping and synchronizing torques induced on generators by FACTS stabilizers in multimachine power systems[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1996, 11(4): 1920-1925.
- [3] WANG H F. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. Part III: Unified power flow controller[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2000, 15(3): 978-983.
- [4] 律方成, 王亚玲, 杨以涵, 等. TCSC 阻尼系统低频振荡的控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 23-26.
LÜ Fang-cheng, WANG Ya-ling, YANG Yi-han, et al. The control method analysis of TCSC in damping low-frequency oscillation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(7): 23-26.
- [5] 杨晓东, 房大中, 刘长胜, 等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 55-63.
YANG Xiao-dong, FANG Da-zhong, LIU Chang-sheng, et al. An adaptive SVC fuzzy controller for damping tie-link low frequency oscillation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 55-63.
- [6] 曲祖义, 于继来, 柳焯. 相间功率控制器控制机理的电路解析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 37-40.
QU Zu-yi, YU Ji-lai, LIU Zhuo. Circuit analysis for the mechanism of interphase power controller[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(3): 37-40.
- [7] 柳焯. 相间功率控制器运行状态分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(3): 69-71.
LIU Zhuo. Operation state analysis of interphase power controller[J]. *Journal of Tsinghua University (Sci. & Tech.)*, 1999, 39(3): 69-71.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

刘修宽(1973-),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:windlxk@sina.com);
蒋维勇(1979-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制;

周苏荃(1958-),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统状态估计;
王 祁(1944-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能测量和信号处理;
柳 焯(1929-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统分析与控制。

Enhancing stability of interconnected power system with IPC

LIU Xiu-kuan,JIANG Wei-yong,ZHOU Su-quan,WANG Qi,LIU Zhuo
(Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: The strategies of controllable IPC(Interphase Power Controller) to enhance the synchronization of interconnection system are compared. The mechanism of tie-link power oscillation is analyzed from the view of transient oscillation energy function. By regulating the tie-link power to mitigate the transient oscillation energy of interconnected system,the damping control strategy of IPC parameters is achieved. An adaptive fuzzy controller is designed,which selects the power and the phase difference of both ends of tie-link as control signals and deals with the gain coefficient in adaptive fuzzy regulation. With a four-machine two-area system as an example,the transient time-domain digital simulation is carried out under different conditions. Results show that the proposed controller makes the interconnected system synchronized and damps the tielink oscillation effectively,at the same time the transmission power through tie-link and voltages of key nodes are ensured.

This project is supported by National Natural Science Fund of China(50177006,59477010).
Key words: interconnected power system; interphase power controller; low frequency oscillation; FACTS

(上接第 26 页 continued from page 26)

作者简介:

傅 旭(1976-),男,辽宁锦州人,博士研究生,从事电

力系统安全控制方面的研究工作(E - mail :fuxu@mailst.xjtu.edu.cn);

王锡凡(1936-),男,河北安平人,教授,博士研究生导师,从事电系统分析及电力市场方面的研究工作。

On-line voltage stability monitoring for electric power system
Part 1:On-line voltage stability index considering
load static characteristics

FU Xu,WANG Xi-fan

(Department of Electric Power Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)
Abstract: Based on the load static characteristics and local measurements,a new index for on-line static voltage stability analysis is proposed. The ZIP load model is introduced and the equivalent line current is divided into real and imaginary parts based on Thevenin equivalent circuit. After eliminating the active power and substituting the reactive power of ZIP load for the imaginary part,a quadratic is obtained,which is processed by the root discriminant to deduce a voltage stability index VSIQ. Similarly,eliminating the reactive power,VSIP is derived. The smaller of VSIQ and VSIP becomes the bus voltage stability index VSI and the bus with the smallest VSI is the weakest one of system. The proposed index is tested on IEEE 14-bus and IEEE 30-bus systems, and the simulative results indicate that,the more the percentage of constant power is,the smaller the VSI will be. When the percentage of constant power is identical,the more the percentage of constant current is,the smaller the VSI will be.

This project is supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217905).
Key words: voltage stability; bus voltage stability index; load static characteristics