

## 提高系统稳定性的调谐型 TCIPC 非线性控制器设计

李娟<sup>1</sup>, 闫乃欣<sup>1</sup>, 郎绪婷<sup>2</sup>, 郑明<sup>3</sup>(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华能鹤岗电厂, 黑龙江 佳木斯 154000;  
3. 衡水供电公司, 河北 衡水 053000)

**摘要:** 根据相间功率控制器(IPC)功率控制特性,通过对比调谐型 IPC 与非调谐型 IPC 调节功率的灵敏度,说明了调谐型 IPC 对联络线功率的调节能力比非调谐型 IPC 强。基于微分几何仿射非线性控制理论,推导出调谐型可控相间功率控制器(TCIPC)仿射非线性系统模型,并根据状态反馈精确线性化方法,设计了调谐型 TCIPC 非线性控制器。以单机无穷大系统中串入调谐型 TCIPC 为例进行仿真。结果表明:采用所提出的控制方法设计的调谐型 TCIPC 控制器,在系统发生大干扰后具有良好的阻尼性能,可以起到提高系统暂态稳定性的作用。

**关键词:** 相间功率控制器; 仿射非线性控制; 暂态; 稳定性; 非线性系统; 线性化; 阻尼

**中图分类号:** TM 712

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.011

## 0 引言

柔性交流输电系统(FACTS)技术是现代电力技术发展的重要方向,它可以提高电力系统的传输能力和稳定水平<sup>[1-2]</sup>。相间功率控制器(IPC)作为 FACTS 元件的一种,最早是由加拿大魁北克输电技术革新中心提出来的<sup>[3]</sup>。IPC 通过等效改变线路的电抗、移相角等参数改变线路的输送能力,在增加线路的传输功率、限制短路电流及电压解耦等方面的优良特性已得到公认<sup>[4]</sup>。目前利用可控相间功率控制器(TCIPC)快速提高电力系统的稳定性已得到电力工作者一定的关注。

目前对 TCIPC 参数进行控制来提高系统稳定性的研究集中在采用传统的 PI 控制方式<sup>[5-6]</sup>。电力系统是典型的非线性系统,非线性控制能够反映系统的非线性特性和不确定性,因而具有较好的适应性和鲁棒性。本文基于微分几何理论的状态反馈精确线性化方法对 TCIPC 参数进行控制来提高系统的稳定性。

## 1 IPC 功率控制特性分析

对 IPC 参数的调节可以分为 2 种情况:同时调节电容和电感参数,使 IPC 工作于调谐状态;单独调节电感或电容参数,使 IPC 工作于非调谐状态。由于单独调节电容参数涉及电压及无功部分,情况较复杂,因此仅研究单独调节电感的情况。为了研究这 2 种情况下的 IPC 调节功率的性能,必须对可调 IPC 功角特性进行分析。

以文献[7]中 IPC240 连接于两系统间联络线为例,图 1 中仅给出了 IPC 连接点一相接线图,另外两相类同。图中,  $U_{AS}$ 、 $U_{BS}$ 、 $U_{CS}$  为 IPC 入口 A、B、C 三相对称电压相量;  $U_{AR}$ 、 $U_{BR}$ 、 $U_{CR}$  为 IPC 出口 A、B、C 三相对称电压相量;  $I_{AR}$  为联络线 A 相电流相量;  $P_{AR}$  为联络线 A 相有功功率;以  $U_{AR}$  作为参考相量,  $U_{AS}$  超前  $U_{AR}$  的角度为  $\delta$ 。

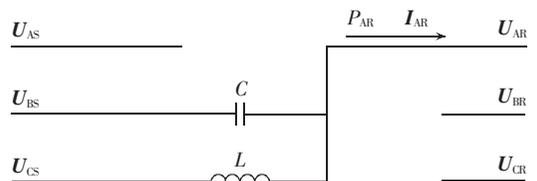


图 1 IPC 电路模型

Fig.1 Model of IPC circuit

如图 1 所示,由 IPC 出口流入联络线的功率为:

$$P_{AR} = \text{Re}(\mathbf{U}_{AR} \mathbf{I}_{AR}^*) = \frac{U_{AS} U_{AR}}{\omega L} \sin\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{U_{AS} U_{AR}}{1/(\omega C)} \sin\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1)$$

对于调谐型 IPC,定义 IPC 电抗为  $X_{IPC} = \omega L = \frac{1}{\omega C}$ ,

则由式(1)可得:

$$P_{AR} = \frac{\sqrt{3} U_{AS} U_{AR}}{X_{IPC}} \cos\delta \quad (2)$$

对于非调谐型 IPC,则  $X_L = \omega L$ ,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ,其中  $X_L$  是可变量,则由式(1)可得:

$$P_{AR} = \left( \frac{U_{AS} U_{AR}}{2X_C} - \frac{U_{AS} U_{AR}}{2X_L} \right) \sin\delta + \left( \frac{\sqrt{3} U_{AS} U_{AR}}{2X_C} + \frac{\sqrt{3} U_{AS} U_{AR}}{2X_L} \right) \cos\delta \quad (3)$$

分析式(2)可知,调谐型 IPC 的功角特性曲线为一系列的余弦曲线,当  $X_{IPC}$  增大时,功角特性曲线极

收稿日期:2012-04-21;修回日期:2013-03-14

基金项目:吉林省教育厅科研规划项目(200618)

Project supported by Research Planning Project of Education Department of Jilin Province(200618)

限值减小,传输能力减小;而非调谐型 IPC 的功角特性比较复杂,当  $X_c$  一定时,对于可调节的  $X_L$ ,其功角特性曲线各不相同,由式(3)可知,在其功角特性表达式中余弦项占主导作用,正弦项较小。调谐型 IPC 与非调谐型 IPC 的功角特性曲线如图 2 所示。

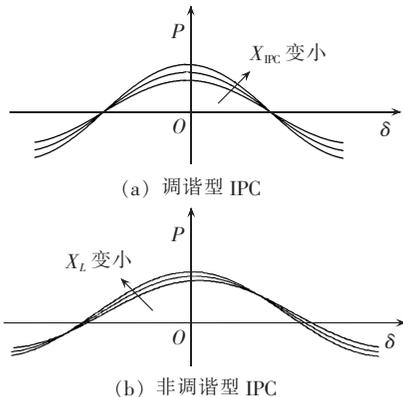


图 2 IPC 功角特性曲线  
Fig.2 P-δ curves of IPC

对式(2)、(3)分别求导可得联络线传输功率与 IPC 可调参数变化量的关系为:

$$\Delta P_1 = \frac{dP_{AR}}{dX_{IPC}} = -\frac{\sqrt{3} U_{AS} U_{AR}}{X_{IPC}^2} \cos \delta \quad (4)$$

$$\Delta P_2 = \frac{dP_{AR}}{dX_L} = \frac{U_{AS} U_{AR}}{2X_L^2} \sin \delta - \frac{\sqrt{3} U_{AS} U_{AR}}{2X_L^2} \cos \delta \quad (5)$$

IPC 两端电压相角差并不大,通常在  $-25^\circ < \delta < 25^\circ$  范围内<sup>[8]</sup>。对比式(4)和式(5),显然在  $X_{IPC} = X_L$  的条件下联络线功率的变化率  $|\Delta P_1| > |\Delta P_2|$ ,即调谐型 IPC 调节功率的灵敏度比非调谐型 IPC 要高。这说明了调谐型 IPC 对联络线潮流的调节能力比非调谐型 IPC 的强。

## 2 调谐型 TCIPC 非线性控制器设计

电力系统是典型的非线性系统,非线性控制能够反映系统的非线性特性和不确定性。本文基于微分几何理论的状态反馈精确线性化方法设计了调谐型 TCIPC 非线性控制器以提高系统的暂态稳定性。

### 2.1 调谐型 TCIPC 的仿射非线性系统模型

假设在单机无穷大系统的输电线路中间安装 TCIPC,并经双回输电线与无穷大母线侧相连,等效电路图如图 3 所示,图中  $X$  为双回输电线的等效电抗,  $\phi_1, \phi_2$  分别为 TCIPC 电感支路和电容支路的移相角。

如图 3 所示,TCIPC 利用移相器 PST1 和 PST2 实现 IPC 的移相功能。将 IPC 的电感支路与 2 个反并联的晶闸管串联,通过控制晶闸管的触发延迟角  $\alpha$  等效地改变电感支路的电抗参数;通过晶闸管控制投切不同组数的电容器等效地改变电容支路的电容参

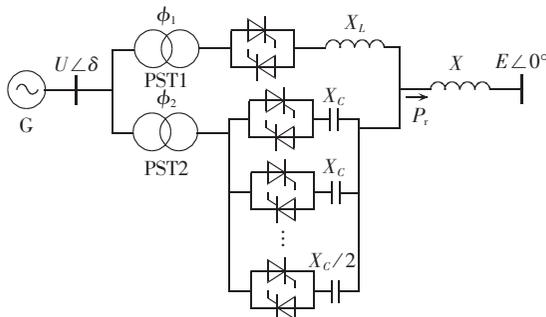


图 3 安装 TCIPC 装置的单机无穷大系统  
Fig.3 Single-machine infinite-bus system with TCIPC

数。TCIPC 电感支路的晶闸管触发延迟与电纳之间的关系为<sup>[9]</sup>:

$$B_{L(\alpha)} = \frac{1}{X_L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (6)$$

其中,  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ 。

通过投切不同组数的电容器来实现电容支路等效参数的调节,为了能对参数进行接近于无级调节,按照二进制系统来选择不同组成部分的电容器的容量。在这种方案中,  $n-1$  个电容器的电纳选择为  $B_c$ ,而另外一个电容器的电纳选择为  $B_c/2$ ,这样电容器容量变化的总步数就扩大为  $2n$ 。

TCIPC 电容支路电容器投切组数与电纳之间的关系为<sup>[9]</sup>:

$$B_c = \left( n - \frac{1}{2} \right) \omega C \quad (7)$$

由图 3 可以得到联络线上的有功功率为<sup>[10]</sup>:

$$P_r = \frac{X_L(\alpha) U E \sin(\delta + \phi_2) - X'_c U E \sin(\delta + \phi_1)}{X [X_L(\alpha) - X'_c] - X_L(\alpha) X'_c} \quad (8)$$

其中,  $X_L(\alpha)$  为可调节感抗,  $X'_c$  为可调节容抗。选择调谐型 IPC,则  $X_L(\alpha) = X'_c = X_{IPC}$ 。

若略去线路和 TCIPC 的电磁暂态过程,则由图 3 可求出发电机电磁功率表达式:

$$P_e = \frac{2EU}{X_{IPC}} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \quad (9)$$

研究单机无穷大系统暂态稳定性时,发电机采用二阶模型,其转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_D - P_e) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $\delta$  为功角(rad);  $H$  为发电机组的惯性时间常数(s),  $P_m$  为发电机输入机械功率(标么值);  $P_e$  为电磁功率(标么值);  $P_D$  为阻尼功率(标么值),  $P_D = D[\omega(t) - \omega_0]/\omega_0$ ,  $D$  为阻尼系数。

若假定发电机暂态电势和机械输入功率  $P_m$  恒定,则安装 TCIPC 的单机无穷大系统可用以下非线性状态方程表示:

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0}{H} \left[ P_m - D \frac{\omega(t) - \omega_0}{\omega_0} - \frac{2EU}{X_{TCPC}} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\delta(t)$ 、 $\omega(t)$  为状态变量;  $X_{TCPC}$  为控制变量, 是调谐型 IPC 的电抗。

若选择控制变量:

$$u(t) = 1/X_{TCPC} \quad (12)$$

则式(11)可以写成仿射非线性系统<sup>[11]</sup>:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})u \quad (13)$$

其中, 状态变量  $\mathbf{x} = [\omega, \delta]^T$  且  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 。可以得出:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \omega_0 [P_m - D(\omega - \omega_0) / \omega_0] / H \\ \omega - \omega_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{-2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

## 2.2 基于状态反馈精确线性化方法的调谐型 TCIPC 非线性控制模型

对于上述非线性系统, 假如选定其额定运行点处作近似线性化, 并按线性控制理论和方法进行设计, 那么当实际系统运行在远离近似线性化所选的状态点时, 所得到的控制规律很难满足控制系统所要求的稳定性和动态品质。如果在整个(或足够大)状态空间上能导出一种使非线性系统能精确线性化的理论和方法, 按这种方法通过非线性状态反馈和恰当的坐标变换, 可将式(13)表示的仿射非线性系统进行精确线性化, 那么就能保证控制系统的稳定性且具有良好的动态品质。

Frobennius 定理<sup>[12]</sup>给出了状态反馈精确线性化方法的充要条件。在安装 TCIPC 的单机无穷大系统中, 发电机转子运动方程所描述的仿射非线性系统可精确线性化的充要条件为矩阵式(16)<sup>[13-14]</sup>在  $\mathbf{x} = \mathbf{x}^0$  点邻域内是非奇异的。

$$\mathbf{C} = [\mathbf{g}(\mathbf{x}), \text{ad}_f \mathbf{g}(\mathbf{x})] \quad (16)$$

$$\text{ad}_f \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) - \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \sin \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \\ \frac{2\omega_0 EUD}{H^2} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \\ \frac{2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中,  $\text{ad}_f \mathbf{g}(\mathbf{x})$  为向量场  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  沿向量场  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  方向的李导数。

将式(14)、(15)与式(17)代入式(16), 并整理得:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$C_{11} = \frac{-2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)$$

$$C_{12} = \frac{-2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \sin \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) -$$

$$\frac{2\omega_0 EUD}{H^2} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)$$

$$C_{22} = \frac{2\omega_0 EU}{H} \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)$$

其行列式的值为:

$$\det(\mathbf{C}) = \frac{-4\omega_0^3 E^2 U^2}{H^2} \sin^2 \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos^2 \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \quad (19)$$

行列式值在邻域  $\Omega = \{\delta, \omega \mid 0 < \delta < \pi\}$  上不等于零, 因此, 在发电机功角  $\delta \in (0^\circ, 180^\circ)$  内, TCIPC 非线性控制系统是可精确线性化的。按照仿射非线性系统精确线性化的基本步骤, 经过推导, 可将式(12)所描述的非线性系统精确线性化为布鲁诺夫斯基标准型<sup>[15-16]</sup>的完全可控的线性状态方程的新系统输出函数。最后可求得其控制规律为:

$$u = \frac{P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega + \frac{H}{\omega_0} (\Delta\delta + \sqrt{2} \Delta\omega)}{2EU \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)} \quad (20)$$

将上式代入式(12)中, 并整理得:

$$X_{TCPC} = \frac{2EU \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)}{P_m - \frac{D}{\omega_0} \Delta\omega + \frac{H}{\omega_0} (\Delta\delta + \sqrt{2} \Delta\omega)} \quad (21)$$

由式(10)可得:

$$P_m = H\dot{\omega}(t) / \omega_0 + D\Delta\omega / \omega_0 + P_e \quad (22)$$

将式(22)代入(21)中有:

$$X_{TCPC} = \frac{2EU \sin \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \cos \left( \delta - \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right)}{P_e + \frac{H\dot{\omega}(t)}{\omega_0} + \frac{H}{\omega_0} (\Delta\delta + \sqrt{2} \Delta\omega)} \quad (23)$$

式(23)即为最终所要得到的 TCIPC 电抗的非线性控制规律, 由此可实现 TCIPC 非线性控制器, 如图 4 所示。

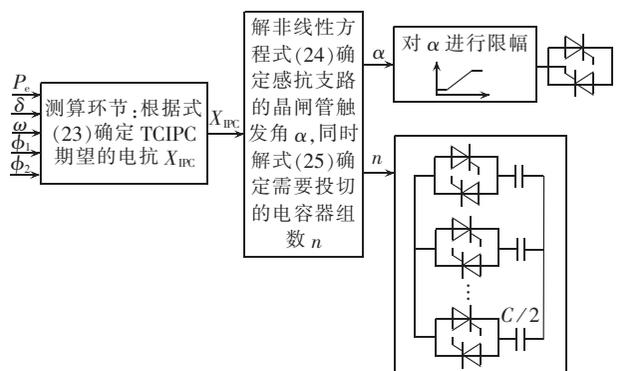


图 4 TCIPC 非线性控制策略

Fig.4 Nonlinear control strategy of TCIPC

当参数  $\delta, \omega, P_e, \phi_1, \phi_2$  给定后,由式(23)计算出系统对 TCIPC 所期望的电抗值  $X_{IPC}$ ,然后求解非线性方程式(24),以确定 TCIPC 的晶闸管的触发延迟角  $\alpha$ ,同时通过式(25)可以确定投切的电容器组数。

$$X_L(\alpha) = X_{IPC} \quad (24)$$

$$X'_C = X_{IPC} \quad (25)$$

### 3 仿真分析

以图 5 所示的单机无穷大系统为例,对 TCIPC 在大干扰作用下提高运行稳定性的作用进行验证。模拟一条传输线末端在 0.1 s 时发生三相短路接地故障,0.2 s 后故障切除。分别对 TCIPC 装置采用非线性控制和 PI 控制方式进行仿真。此时,PI 控制中,  $K_p=0.6, K_i=17$ 。而非线性控制中通过以上测算环节求出的  $X_{IPC}=0.0534 \text{ p.u.}$ 。

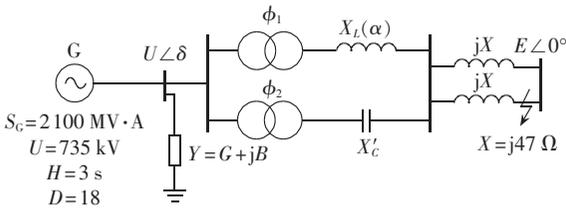


图 5 安装 TCIPC 的单机无穷大系统图

Fig.5 Single-machine infinite-bus system with TCIPC

图 6 给出了  $P_e=1200 \text{ MW}$  时,故障情况下的发电机功角曲线。从图中可以看出,采用 PI 控制时,系统是保持暂态稳定的,但阻尼不足,振荡衰减比较缓慢,直到 0.6 s 以后系统才恢复稳定;而采用 TCIPC 非线性控制时,系统具有良好的阻尼性能,振荡在 0.3 s 以后迅速衰减至稳态。因此,用非线性控制规律设计的 TCIPC 装置非线性控制器可以较显著地改善在大干扰作用下系统的稳定性。

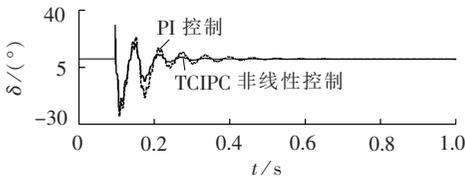


图 6  $P_e=1200 \text{ MW}$  时发电机功角曲线

Fig.6 Power-angle curve of generator when  $P_e=1200 \text{ MW}$

图 7 给出了  $P_e=800 \text{ MW}$  时,采用 TCIPC 非线性控制和 PI 控制下的发电机功角变化情况。从图中可以看出,即使系统的运行工况发生了变化,与 PI 控制相比,采用 TCIPC 非线性控制后系统仍会较快地恢复稳定,即系统进入稳态所用的时间明显减少,整个扰动过程明显缩短。可见,无论系统的运行工况怎样变化,采用 TCIPC 非线性控制都可以较大幅度地提高系统的暂态稳定性。

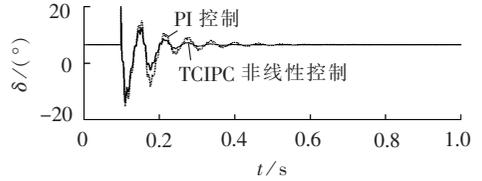


图 7  $P_e=800 \text{ MW}$  时发电机功角曲线

Fig.7 Power-angle curve of generator when  $P_e=800 \text{ MW}$

### 4 结论

a. 根据 IPC 的功率控制特性,分析说明了调谐型 IPC 对联络线功率的调节能力比非调谐型 IPC 强。

b. 基于微分几何的精确线性化方法,将安装调谐型 TCIPC 的单机无穷大系统的非线性状态方程精确化为线性方程,并在此基础上设计了调谐型 TCIPC 非线性控制器。

c. 以单机无穷大系统串入 TCIPC 进行仿真。结果表明:与传统的 PI 控制器相比,设计的 TCIPC 非线性控制器在系统发生大扰动后具有较强的阻尼作用,能够抑制系统的功角振荡,可以较明显地提高系统的暂态稳定性,并可以较好地适应系统运行方式的变化。

### 参考文献:

- [1] FARMAD M, FARHANGI S, AFSHARNIA S, et al. Application of voltage source converter in interphase power controller for power flow control and fault limitation[C]//34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando, FL, USA: IEEE, 2008: 2301-2306.
- [2] 何瑞文, 蔡泽祥. 基于电力系统稳定分析与控制的 FACTS 技术评述[J]. 继电器, 2004, 32(6): 70-75.  
HE Ruiwen, CAI Zexiang. A comment of flexible AC transmission system based on power system stability analysis and control[J]. Relay, 2004, 32(6): 70-75.
- [3] SYBILLE G, HAJ-MAHARSI Y. Simulator demonstration of the inter phase power controller technology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 11(4): 1985-1992.
- [4] 李娟, 康娜娜, 于学均. 改进型 IPC 抑制过电压的研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 49-52.  
LI Juan, KANG Nana, YU Xuejun. Improve IPC to restrain over-voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 49-52.
- [5] SAMADI A, FARHANGI S. Analysis, control and modeling of cascaded multilevel converter-based IPC[C]//34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando, FL, USA: IEEE, 2008: 3213-3218.
- [6] 朱慧瑜, 童陆园, 郭春林. FACTS 暂态稳定控制的系统模型的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(16): 13-16.  
ZHU Huiyu, TONG Luyuan, GUO Chunlin. System models for transient stability control of FACTS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(16): 13-16.
- [7] 李娟, 赵露, 柳焯. 可控相间功率控制器(TCIPC)运行特性分析

- [J]. 继电器, 2006, 34(12): 42-45.
- LI Juan, ZHAO Lu, LIU Zhuo. Operation characteristic of thyristor controlled interphase power controller[J]. Relay, 2006, 34(12): 42-45.
- [8] 刘修宽, 蒋维勇, 周苏荃, 等. 相间功率控制器的潮流调控性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 11-14.
- LIU Xiukuan, JIANG Weiyong, ZHOU Suqian, et al. Enhancing stability of interconnected power system with IPC[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 11-14.
- [9] 李娟, 赵露, 张冰冰, 等. 基于参数协调的可控相间功率控制器调节特性研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 16-18.
- LI Juan, ZHAO Lu, ZHANG Bingbing, et al. Adjustment characteristics of thyristor controlled interphase power controller based on parameter coordination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 16-18.
- [10] MOHAMMADI M, GHAREHPETIAN G B. Thyristor controlled interphase power controller modeling for power system dynamic studied[C]//2004 IEEE Region 10 Conference. [S.l.]: IEEE, 2004: 355-358.
- [11] 尹建华, 江道灼. 可控串补的非线性控制对电力系统稳定性的影响研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(3): 70-74.
- YIN Jianhua, JIANG Daozhuo. TCSC nonlinear control influence on power system stability[J]. Journal of Power Technology, 1999, 14(3): 70-74.
- [12] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 56-60.
- [13] PILOTTO A S, CARVALHO A R. The impact of different TCSC control methodologies on the subsynchronous resonance problem [C]//Proceedings of EPRI Conference on FACTS. Washington DC, USA: [s.n.], 1996: 145-152.
- [14] PILOTTO L A S. Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 243-252.
- [15] 吴捷, 杨明. 非线性控制在电力系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 15-20.
- WU Jie, YANG Ming. Nonlinear control and its applications in power system[J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 15-20.
- [16] 王杰, 陈陈. 电力系统中微分代数模型的非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 15-18.
- WANG Jie, CHEN Chen. Nonlinear control of differential algebraic model in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 15-18.

#### 作者简介:

李娟(1972-), 女, 山东荣城人, 教授, 主要从事电力系统运行控制及 FACTS 研究(E-mail: hitljzgy@yahoo.com.cn);

闫乃欣(1986-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 从事电力系统运行控制及 FACTS 研究(E-mail: yannaixinnedu@163.com)。

## Nonlinear controller of TCIPC for improving power system stability

LI Juan<sup>1</sup>, YAN Naixin<sup>1</sup>, LANG Xuting<sup>2</sup>, ZHENG Ming<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Hegang Power Plant, Jiamusi 154000, China;

3. Hengshui Power Supply Co., Hengshui 053000, China)

**Abstract:** Based on the active power control characteristic of IPC(Interphase Power Controller), the sensitivity of power regulation is compared between tuned IPC and non-tuned IPC, which shows the tieline power regulation capability of tuned IPC is better than that of non-tuned IPC. The model of tuned nonlinear system is derived based on the theory of affine nonlinear control for the TCIPC(Thyristor Control Interphase Power Controller) and the single-machine infinite-bus system with serial tuned TCIPC is simulated, which shows the tuned TCIPC designed has excellent damping performance during serious system oscillation, improving the system transient stability remarkably.

**Key words:** inter-phase power controller; affine nonlinear control; transients; stability; nonlinear systems; linearization; damping