

基于参数协调的可控相间功率 控制器调节特性研究

李 娟¹, 赵 露¹, 张冰冰¹, 柳 焯²

(1. 东北电力大学 电气工程系, 吉林 吉林 132012;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究了可控相间功率控制器(TCIPC)的基本结构和数学模型,通过控制晶闸管触发角等效调节相间功率控制器的基本参数,从而协调输出功率,其中,通过控制晶闸管触发延迟角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数。基于简化模型绘制出 TCIPC 功率 $P-Q$ 运行曲线图,对参数协调下的 TCIPC 调节特性进行研究。以实例验证了由带 TCIPC 联络线进行交流弱联系的两侧电网在相位相对滑移时,可以通过协调 TCIPC 的等效参数控制联络线传输的功率,避免有功功率大幅波动,并保证端口的电压质量,有效地缓解了常规 IPC 可能出现的过电压问题。

关键词: 可控相间功率控制器; 参数协调; 功率调节; $P-Q$ 运行曲线; 过电压

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)02-0016-04

0 引言

相间功率控制器 IPC(Interphase Power Controller)作为柔性交流输电系统(FACTS)家族的新成员,最早是由加拿大魁北克输电技术革新中心的科技小组提出来的^[1],它具有潮流控制、限制短路电流和电压解耦的优良特性^[2-6],曾被 IEEE/PES 认为是当前最适宜开发的控制器之一^[7]。

高阻效应是实现 IPC 隔离故障优良特性的先决条件,但是这种高阻效应具有双重性,一方面有利于缓解电网之间事故波及,但另一方面又削弱了互联电网之间的同步力矩,使得两侧电网在负荷变化不一致时易产生相位的相对滑移^[8],而相位的相对滑移将引起联络线功率波动(波动幅度可能会较大)以及 IPC 两侧端口电压不满足电压运行质量的要求^[9-11]。如果能够及时采取措施,将有利于两侧电网的稳定运行。

IPC 基本结构是由 2 条支路并联构成的(如图 1 所示),一条是电感支路,一条是电容支路,分别受控于不同的移相电压。

根据移相电压的不同,可以构成各种不同类型的 IPC^[12-13];特定类型的 IPC 电压移相角是确定的,只能通过控制电感支路和电容支路的参数控制联络线的潮流以及端口电压。

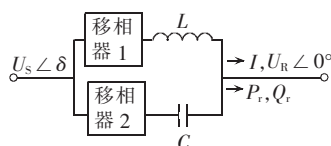


图 1 IPC 的结构模型图

Fig.1 Structure of IPC

通过电力电子开关器件晶闸管控制 IPC 的电容、电感支路构成可控相间功率控制器 TCIPC (Thyristor Controlled IPC),提高潮流控制的速度实现动态调节。根据电感支路和电容支路的参数协调,研究了 IPC 控制的联络线潮流运行区域,通过参数协调控制使联络线潮流和端口电压满足运行需要。

1 TCIPC 数学模型

动态 TCIPC 是将 IPC 的 2 条支路分别由晶闸管进行触发控制。电感支路与 2 个反并联的晶闸管串联,通过控制晶闸管触发延迟角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电容参数。TCIPC 的基本结构如图 2 所示。

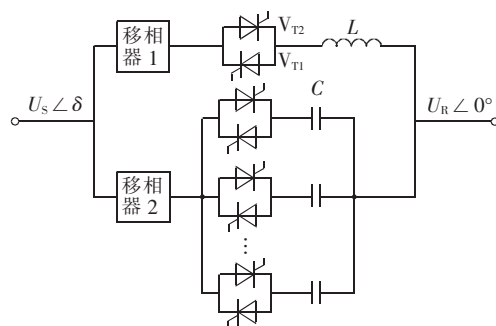


图 2 TCIPC 的结构模型图

Fig.2 Structure of TCIPC

1.1 电感支路数学模型

通过控制电感支路晶闸管的触发延迟角 α ,可连续调节流过电抗器的电流在零(晶闸管阻断)到最大值(晶闸管全导通)之间变化,相当于改变电抗器

的等效电抗值。电感支路的等效电纳值可表示为^[14]

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

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2$$

式中 X_L 为电感的电抗值; α 为晶闸管的触发延迟角。

由式(1)可知:电感支路的基波电纳是连续可控的,最小值为 $B_{F,\min}(\alpha) = 0$ (对应 $\alpha = \pi/2$),最大值为 $B_{F,\max}(\alpha) = 1/X_L$ (对应 $\alpha = 0$)。

计及移相电压作用时,电感支路的等效电纳可由式(2)(3)确定:

$$U_L = U_S e^{j(\delta - \Psi_1)} - U_R = U_S \cos(\delta - \Psi_1) + jU_S \sin(\delta - \Psi_1) - U_R = \sqrt{[U_S \cos(\delta - \Psi_1) - U_R]^2 + [U_S \sin(\delta - \Psi_1)]^2} e^{j\phi} \quad (2)$$

$$\phi = \pi + \arctan \frac{U_S \sin(\delta - \Psi_1)}{U_S \cos(\delta - \Psi_1) - U_R}$$

式中 U_S, U_R 分别为 IPC 入口和出口处的电压; U_L 为电感两端的电压相量; Ψ_1 为电感支路的移相角。令 $\alpha = \alpha' - 90^\circ + \phi$, 代入式(1)中得:

$$B_F(\alpha') = \frac{1}{X_L} \left\{ 1 - 2(\alpha' - 90^\circ + \phi)/\pi - \frac{1}{\pi} \sin[2(\alpha' - 90^\circ + \phi)] \right\} \quad (3)$$

$$90^\circ - \phi \leq \alpha' \leq 180^\circ - \phi$$

1.2 电容支路数学模型

通过晶闸管投切不同组数的电容实现电容支路等值参数的调节,为了对参数进行接近于无级调节,按照二进制系统选择不同组成部分的电容器容量。在这种方案中, $n-1$ 个电容器的电纳选择为 B , 而另外一个电容器电纳选择为 $B/2$ 。这样,电容器容量变化的总步数就扩大为 $2n$ 。

为了减小电容器投入过程中的冲击电流和电流的阶跃变化对晶闸管的损坏,投入时刻一般取供电电压为峰值的时刻(电容器电压已预充为峰值)。为了限制计划投切操作、错误时刻投切操作或电压极性不合适时投切操作所产生的电流暂态分量,一般安装小型电感与电容串联。电感值的选择一般按照如下规则^[15]:使 LC 支路的自然谐振频率为 $4 \sim 5$ 倍的系统额定频率,这样既可以保证电感不会与网络产生谐振,也不会影响电容支路的控制。单元电容器组最小电纳为 $B_{C,\min} = \omega C/2$; 最大电纳为 $B_{C,\max} = (n-1/2)\omega C$ 。

2 参数协调下的 TCIPC 功率控制

通过控制 IPC 每相电感支路的触发角,以及电容支路不同组数的电容器可以等效地调节 IPC 的支路参数,直接控制联络线的功率以及端口电压。由图 2 TCIPC 的简化模型可以推出功率表达式为

$$P_r = B_L(\alpha)U_R U_S \sin(\delta - \Psi_1) - B_C U_R U_S \sin(\delta - \Psi_2) \quad (4)$$

$$Q_r = B_L(\alpha)U_R U_S \cos(\delta - \Psi_1) - B_L(\alpha)U_R^2 - B_C U_R U_S \cos(\delta - \Psi_2) + B_C U_R^2 \quad (5)$$

则 TCIPC 的 2 条支路功率关系表达式为

$$P_{Lr}^2 + [Q_{Lr} + B_L(\alpha)U_R^2]^2 = [B_L(\alpha)U_R U_S]^2 \quad (6)$$

$$P_{Cr}^2 + (Q_{Cr} - B_C U_R^2)^2 = (B_C U_R U_S)^2 \quad (7)$$

式中 P_r, Q_r 为联络线上传输的有功功率和无功功率; $P_{Lr}, Q_{Lr}, P_{Cr}, Q_{Cr}$ 分别为电感、电容支路传输的有功和无功功率; $B_L(\alpha), B_C$ 为电感和电容支路的等效电纳。

由式(4)~(7)可见:电感和电容支路传输的有功和无功功率随等效电纳变化而变化;电感和电容支路的功率 $P-Q$ 曲线组成的区域均为一个圆域,圆域的大小分别受电感和电容参数的影响。

图 3 表示 TCIPC-240 型 IPC 随电感和电容参数变化的 $P-Q$ 运行区域,圆的半径主要取决于等效电感和电容值;当端口电压满足 $U_S = U_R$ 时曲线圆经过坐标原点。

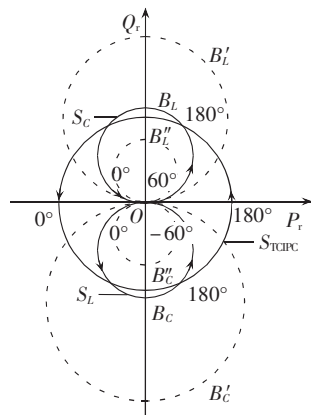


图 3 TCIPC 的 $P-Q$ 功率图
Fig.3 $P-Q$ diagram of TCIPC

由 $P-Q$ 图可知:当 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间变化时,电感、电容所传输的有功和无功功率分别为:由圆心根据给定的 δ 值做一条射线与 $P-Q$ 曲线交点的横坐标和纵坐标,而此时 TCIPC 所传输的有功和无功功率分别为两者的代数和,当且仅当 $B_L(\alpha) = B_C$ 时,TCIPC 的有功、无功曲线为一个圆(实际运行根据 δ 的取值范围, $P-Q$ 曲线只是圆的一部分)。

通过带 TCIPC 联络线进行电网交流弱联系,在两侧电网相位相对滑移时会产生联络线功率波动和端口电压越限问题。由于电感和电容支路的功率可以通过调节等效的电感和电容参数进行连续控制;而端口电压主要与互联网络之间传输的无功功率直接相关,通过调节等效的电感参数和电容参数可以控制无功功率的传输,从而调节端口电压。

提高端口电压需要增加 TCIPC 向端口注入的无功功率,以无功需求量增大为例,利用图 4 所示的功率圆图说明:参数协调下维持传输有功功率不变,调节无功功率的基本原理。

设 $\delta = 0^\circ$, 电感和电容的初始 $P-Q$ 曲

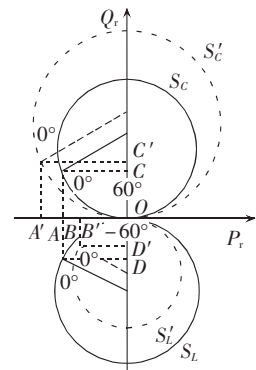


图 4 参数协调下功率调节原理图
Fig.4 Principle of power adjustment based on parameter coordination

线由 S_L, S_C 表示。其中 $P_{Cr}=OA, P_{Lr}=OB, P_{TCIPC}=OA+OB; Q_{Cr}=OC, Q_{Lr}=OD, Q_{TCIPC}=OC+OD$ 。当系统所需的无功功率增大时,由于电感消耗无功,电容发出无功,所以相应的增大 S_C 的半径,减小 S_L 的半径,此时得到 S'_C 和 S'_L ,其中 $P'_{Cr}=OA', P'_{Lr}=OB', P'_{TCIPC}=OA'+OB'; Q'_{Cr}=OC', Q'_{Lr}=OD', Q'_{TCIPC}=OC'+OD'$ 。为了维持传输的有功功率不变,满足的基本条件时是调节前后电感、电容支路所传输的有功功率的代数和不变,即 $OA+OB=OA'+OB' (P_{Lr}+P_{Cr}=c \text{ (常数)})$,而此时 TCIPC 多发出的无功功率增量为 $\Delta Q_{TCIPC}=(OC'+OD')-(OC+OD)$ 。在电感、电容参数调节中,检验端口电压是否满足约束条件:

送端端口电压 $U_{Amin} \leq U_A \leq U_{Amax}$

受端端口电压 $U_{amin} \leq U_a \leq U_{amax}$

3 算例分析

以东北-华北电网交流弱联系为背景,虚拟降压运行(500 kV 降至 220 kV)的联络线在绥中一侧装设有 TCIPC-240。这种动态 TCIPC 的特点是:电感和电容支路的移相电压是通过相与相之间的穿越联接而成,如图 5 所示(S 侧为东北电网,R 侧为华北电网)。假设东北电网通过联络线向华北电网输送的有功功率为 6.0 p.u. ($U_B=220 \text{ kV}, S_B=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$),在此运行工况下,分别对两侧电网进行等值,采用电力系统潮流模型跟随运行状态变化进行电网等值参数的跟踪估计^[9]。东北网等值电势 $E_{eq1}=1.1090 \text{ p.u.}$,等值电抗 $X_{eq1}=0.0373 \text{ p.u.}$;华北电网的等值电势 $E_{eq2}=1.0538 \text{ p.u.}$,等值电抗 $X_{eq2}=0.034 \text{ p.u.}$ 。端口电压与两侧电网等值参数、TCIPC 参数之间的关系式,联络线传输功率与两侧电网等值参数、TCIPC 参数之间的关系等式见文献[9]。

为验证 TCIPC 通过参数协调,在两侧电网相位相对滑移过程中维持联络线有功功率为恒定值,调节无功功率以维持端口电压满足运行需要的能力,

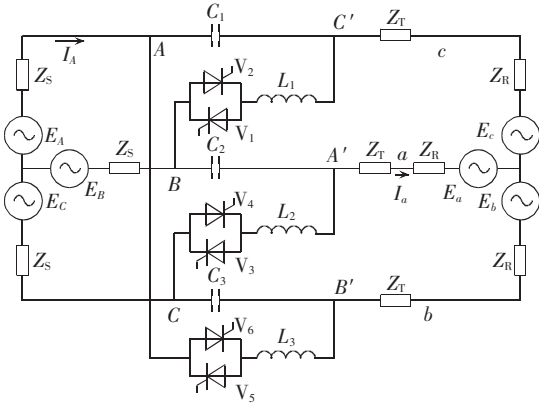


图 5 带 TCIPC 联络线进行交流弱互联的电网等值电路
Fig.5 Equivalent circuit of weakly AC-linked power systems by tie line with TCIPC

设初始运行状态两侧系统等值电势相角差 $\Psi=-30^\circ$ (以受端侧华北电网等值电源的电动势为参考电压),由于扰动相位角发生滑移,表 1 中每隔 15° 列出不进行参数协调和通过参数协调后的联络线功率和端口电压的结果。

控制电感支路的晶闸管触发延迟角可以等效地调节电感支路的感纳,投切不同组数的电容器可以等效地改变电容支路的容纳。比较表 1 中左右两侧的结果可见:当送端和受端电网发生相位相对滑移时,只通过改变电感支路晶闸管触发角调节电感支路的等效参数,虽然可以使联络线潮流满足运行要求,但经带 IPC 联络线连接的两侧电网端口处电压会越限。为了降低 TCIPC 两侧端口处的电压,可以同时调节电感支路和电容支路,减小电容支路的容纳,增大电感支路的感纳,从而减少 TCIPC 输出的无功功率,保证端口电压质量;反之亦然。由表 1 中右侧的结果可见:当两侧电网相位滑移在一定的范围内可以通过对电容参数和电感支路触发延迟角的协调控制维持联络线传输功率为基本不变的值,并保证端口电压质量。

表 1 联络线功率和端口电压
Tab.1 Tie-line power flow and port voltage

$\Psi/(^\circ)$	参数协调前									参数协调后								
	$P/\text{p.u.}$	$Q/\text{p.u.}$	$U_A/\text{p.u.}$	$U_a/\text{p.u.}$	L/H	$C/\mu\text{F}$	$\alpha/(^\circ)$	$B_L(\alpha)/\text{p.u.}$		$P'/\text{p.u.}$	$Q'/\text{p.u.}$	$U_A'/\text{p.u.}$	$U_a'/\text{p.u.}$	L'/H	$C'/\mu\text{F}$	$\alpha'/(^\circ)$	$B_L(\alpha')/\text{p.u.}$	
30	6	-0.840	1.062 6	1.005	0.18	21.5	135	3.273 3		-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	6	3.300	1.204 6	1.137	0.18	21.5	155	1.859 1		6	0.348 8	1.077 6	1.023 2	0.18	18.5	142	3.489 2	
0	6	5.024	1.253 1	1.183	0.18	21.5	162	1.915 3		6	0.286 9	1.098 1	1.044 9	0.18	16.5	148	3.725 8	
-15	6	6.000	1.277 6	1.209	0.18	21.5	165	2.416 0		6	-0.025 8	1.082 6	1.034 3	0.18	13.5	150	4.610 4	
-30	6	6.680	1.292 1	1.225	0.18	21.5	166	3.278 7		6	0.191 7	1.087 0	1.041 7	0.18	11.5	152	5.467 5	

4 结论

研究了基于晶闸管控制的相间功率控制器基本结构和数学模型,通过改变晶闸管的触发角和投切不同组数的电容器可以连续改变 TCIPC 的等效参数,从而协调控制相间功率控制器输出的功率。

研究了相间功率控制器的有功-无功功率运行区域,通过 $P-Q$ 曲线圆说明参数协调下的功率控制

机理。以两实际电网通过 TCIPC-240 进行交流弱联系为例,验证通过电感和电容支路参数协调,在两侧电网相位相对滑移过程中,可以维持联络线功率为一基本不变的值,并保证端口电压满足运行质量的要求。

参考文献:

[1] BROCHU J, PELLETIER P, BEAUREGARD F, et al. The interphase power controller: a new concept for managing power flow within

- AC networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 833-841.
- [2] SYBILLE G, HAJ-MAHARS Y, MORIN G, et al. Simulator demonstration of the interphase controller technology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1985-1992.
- [3] BROCHU J, BEAUREGARD F, MORIN G, et al. Interphase power controller adapted to the operating conditions of networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 961-969.
- [4] BROCHU J, BEAUREGARD F, LEMAY J, et al. Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 888-893.
- [5] 于继来, 柳焯. 相间功率控制器的稳态分析及其与移相器的特性比较[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 25-34.
- YU Ji-lai, LIU Zhuo. Steady state analysis of interphase power controller and its characteristic comparison to phase shifter[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 25-34.
- [6] 刘修宽, 周苏荃, 柳焯. 基于IPC模糊控制的互连电网潮流控制研究[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(3): 250-256.
- LIU Xiu-kuan, ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. Research on the control of tie-line power flow on interconnected power system based on the IPC fuzzy control[J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(3): 250-256.
- [7] 何大愚. 柔性交流输电技术及其控制器研制的新发展[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 1-6.
- HE Da-yu. FACTS technology and new progress in the development of its controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 1-6.
- [8] 曲祖义, 于继来, 柳焯. 相间功率控制器机理的电路解析[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.
- [9] 李娟, 刘修宽, 柳焯, 等. 负荷频率变化时IPC及其两侧电网的动态行为[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 71-75.
- LI Juan, LIU Xiu-kuan, LIU Zhuo, et al. Dynamic behavior of IPC and power system on both sides considering the variation of load frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 71-75.
- [10] 柳焯. 相间功率控制器运行状态分析[J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 69-71.
- LIU Zhuo. Operation state analysis of interphase power controller[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(3): 69-71.
- [11] 刘修宽, 刘彦, 李娟. 基于电网互联的IPC参数选取问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 64-67.
- LIU Xiu-kuan, LIU Yan, LI Juan. IPC parameter selection based on power system interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 64-67.
- [12] BEAUREGARD F, BROCHU J, MORIN G, et al. Interphase power controller with voltage injection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4): 1956-1962.
- [13] HABASHI K, LOMBARD J, MOURAD S, et al. The design of a 200 MW interphase power controller prototype[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(2): 1041-1047.
- [14] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [15] MATHUR R M, VARMA R K. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [16] 刘修宽, 蒋维勇, 周苏荃, 等. IPC增强互联系统稳定性控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 27-31.
- LIU Xiu-kuan, JIANG Wei-yong, ZHOU Su-quan, et al. Enhancing stability of interconnected power system with IPC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 27-31.
- [17] 刘修宽, 蒋维勇, 李娟, 等. 接入IPC的联络线并网启动分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(5): 70-74.
- LIU Xiu-kuan, JIANG Wei-yong, LI Juan, et al. Merging start-up analysis of the tie-line equipped with IPC[J]. Proceedings of the EPSA, 2004, 16(5): 70-74.
- [18] 易善军, 郭志忠, 柳焯. 调谐型相间功率控制器稳态电压基本可行域的解析[J]. 继电器, 2004, 32(1): 6-11.
- YI Shan-jun, GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo. Basic feasible region analysis of tuned IPC steady-state voltage[J]. Relay, 2004, 32(1): 6-11.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

李娟(1972-), 女, 山东荣成人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统运行控制及FACTS研究(E-mail: hitljzg@sohu.com.cn);

赵露(1977-), 女, 辽宁东港人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制及FACTS研究;

张冰冰(1976-), 女, 黑龙江木兰人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制及FACTS研究;

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运行控制及FACTS研究。

Adjustment characteristics of thyristor controlled interphase power controller based on parameter coordination

LI Juan¹, ZHAO Lu¹, ZHANG Bing-bing¹, LIU Zhuo²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The basic structure and mathematic model of TCIPC (Thyristor Controlled Interphase Power Controller) are researched. Parameters of TCIPC are adjusted for power output coordination by controlling the trigger angle of the thyristor. The reactive parameter of the inductance branch is changed by controlling the delayed trigger angle of the thyristor, and the capacitive parameter of the capacitance branch is changed by switching on-off different capacitor groups through the thyristor. The $P-Q$ curve of TCIPC is drawn based on a simplified model, and the adjustment characteristics based on parameter coordination are studied. An example shows that, the active power fluctuation can be avoided and the voltage quality can be assured during the angle slippage between two networks weakly AC-linked by the tie line with TCIPC. The over voltage with IPC is solved.

Key words: thyristor controlled interphase power controller; parameter coordination; power adjustment; $P-Q$ curve; over voltage