

可控相间功率控制器 (TC IPC)运行特性分析

李娟¹, 赵露¹, 柳焯²

(1. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012; 2 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研究了相间功率控制器 IPC (Interphase Power Controller) 基本结构和数学模型, 通过晶闸管触发控制电感支路构成可控相间功率控制器 (TC IPC), 并将其应用于交流弱联系的互联电网中, 推导了晶闸管触发延迟角与 TC IPC 参数以及两侧电网戴维南等值参数之间的关系, 分析了计及两侧电网等值参数影响下的 TC IPC 运行特性。以东北 - 华北电网经带 TC IPC 的联络线交流弱联系为例, 说明 TC IPC 对互联电网具有动态连续潮流控制能力。

关键词: 可控相间功率控制器 (TC IPC); 晶闸管; 触发延迟角; 等值参数; 运行特性

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)12-0042-04

0 引言

相间功率控制器 (IPC) 最早是由加拿大魁北克输电技术革新中心的专家提出来的, 作为一种新型的 FACTS 装置, IPC 具有潮流控制的鲁棒性、限制短路电流及对互联电网实施电压解耦的特性^[1-4]。目前对相间功率控制器的研究大部分局限于固定参数下的特性研究, 而对于随参数变化的研究较少。由于相间功率控制器具有“准异步”互联的特点, 在条件满足的情况下可以允许短时异步运行^[5], 一旦发生异步运行, 需要快速调节网络运行参数以及相间功率控制器的参数以防止异步运行时间过长, 基于晶闸管开关进行电感参数的控制可以满足速度的要求。

本文以 IPC240 为例, 基于晶闸管开关控制 IPC 电感支路, 建立可控相间功率控制器 (TC IPC) 的基本结构和数学模型, 将 TC IPC 联于实际电网中, 分析计及电网等值参数影响下的电感支路等效电抗值, 确定触发延迟角。并以东北—华北电网交流联网为背景, 将 TC IPC 联于东北电网侧, 研究 TC IPC 的潮流控制特性。

1 含 TC IPC 的互联电网及其模型

1.1 结构模型

相间功率控制器是由两条支路构成, 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, 根据受控的移相电压不同, 可以构成不同类型的相间功率控制器例如 IPC240, IPC120 等, 特定类型的相间功率控制器移相控制角是确定的^[1]。

本文以 IPC240 为例进行研究, IPC240 可以通

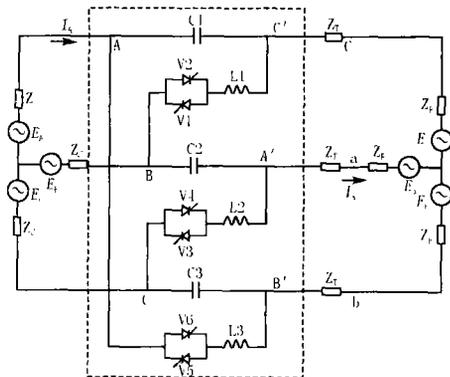


图 1 带 TC IPC 的互联电网结构模型图

Fig 1 Structure of interconnected power system with TC IPC

过相与相之间的不同连接构成移相控制角, 为了可以对电感参数进行调节, 本文将电感支路由两个反关联的晶闸管进行控制, 通过控制晶闸管的触发延迟角可以等效地控制电感支路的电抗参数。基于晶闸管触发控制的 TC IPC 基本结构如图 1 虚线框所示, 将此 TC IPC 进行两互联电网交流弱联系, 送端电网和受端电网分别用戴维南等值参数表示, 基本结构如图 1 所示。

1.2 数学模型

1.2.1 电感支路的等效电纳^[6]

带晶闸管的电感支路的结构模型及触发脉冲控制原理如图 2 中的 (a) 和 (b) 所示。通过控制晶闸管的触发延迟角, 可以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。

设电感支路两端电压为

$$u(t) = U_m \cos(\omega t) \quad (1)$$

将晶闸管视为理想开关,则在正半波时,电抗支路上的电流为:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt = \frac{U_m}{X_L} (\sin t - \sin \alpha) \quad (2)$$

其中:基波电抗 $X_L = \omega L$, L 为电抗器的电感值。当 $t = \alpha$ 时,由于支路电流下降到零,晶闸管自动关断。在负半波,当 $t = \pi + \alpha$ 时,晶闸管反向导通,类似可得到支路上的电流为

$$i(t) = \frac{U_m}{X_L} [\sin t - \sin(\pi + \alpha)] \quad (3)$$

通过分析可知,通过变化触发延迟角 α ,支路上流过的电流可以连续变化,并在 $\alpha = 0$ 时取得最大值,在 $\alpha = \pi/2$ 时,取得最小值。

对支路的电流进行傅里叶分解,可以得到其基波分量的幅值为

$$I_F = \frac{U_m}{X_L} (1 - \frac{2}{\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha) \quad (4)$$

则电感支路的等效电纳为

$$B_F(\alpha) = \frac{I_F}{U_m} = \frac{1}{X_L} (1 - \frac{2}{\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha) \quad (5)$$

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

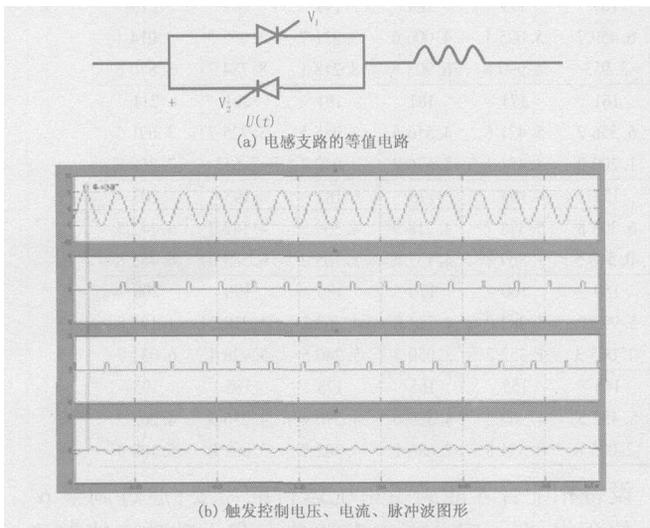


图 2 电感支路晶闸管触发控制原理图

Fig 2 Pulse control principle of thyristor based on inductor branch

1.2.2 含 TCIPC网络的数学模型

以图 1 所示的 TCIPC 进行交流弱联系结构为基础,以 A 相为代表,可以按式 (6) ~ (10) 进行计算^[5],晶闸管控制电感支路的作用可以用等效感抗 $F_L(\alpha)$ 表示。

由送端流入 TCIPC 的电流:

$$I_A = \frac{A_{F1} E_A - A_{F2} E_a}{A_{F3} Z_s + (F_T + F_R) Z_s} \quad (6)$$

其中: $A_{F1} = \frac{F_L(\alpha) + F_C + 3(F_T + F_R)}{3 + F_L(\alpha) + F_C}$

$$A_{F2} = \frac{F_L(\alpha) e^{-j\alpha/3} + F_C e^{j\alpha/3}}{3 + F_L(\alpha) + F_C}$$

由 TCIPC 出口经联络线流入受端的电流:

$$I_a = \frac{A_{F4} E_A - E_a}{A_{F3} Z_s + (F_T + F_R) Z_s} \quad (7)$$

其中: $A_{F3} = \frac{F_L(\alpha) F_C + F_C + F_L(\alpha)}{3 + F_L(\alpha) + F_C}$

$$A_{F4} = \frac{F_L(\alpha) e^{-j\alpha/3} + F_C e^{j\alpha/3}}{3 + F_L(\alpha) + F_C}$$

式 (6)、(7) 中: E_A 、 E_a 分别为送端一侧电网和受端一侧电网的等值电动势; Z_s 为送端侧电网的等值内阻抗, F_R 、 F_T 分别为受端电网等值内阻抗 Z_R 和联络线阻抗 Z_T 与送端电网的等值内阻抗 Z_s 比值; F_L 、 F_C 分别是相间功率控制器中电感元件与电容元件的阻抗相对于送端电网的等值内阻抗的比值,由于本文中电感支路的等值基频电抗是随着触发延迟角连续变化的,所以 F_L 是 α 的函数。其中:

$$F_L = \frac{jX_L(\alpha)}{Z_s e^{j\alpha}} = \frac{X_L(\alpha)}{Z_s} e^{j(\alpha/2 - \alpha)}$$

$$F_C = \frac{-jX_C}{Z_s e^{j\alpha}} = \frac{X_C}{Z_s} e^{-j(\alpha/2 + \alpha)}$$

送端电压和送出的潮流:

$$U_A = E_A - I_A Z_s \quad S_A = U_A I_A \quad (8)$$

$$U_a = E_a + I_a Z_R \quad S_a = U_a I_a \quad (9)$$

与 A 联结的电抗器的电压为:

$$V_{Ac} = A_{F5} \{ (\sqrt{3} e^{j\alpha/6} + F_C) E_a + [(\sqrt{3} e^{-j\alpha/2} (F_T + F_R) - F_C e^{2j\alpha/3}] E_A \}$$

$$A_{F5} = \frac{F_L(\alpha)}{F_L(\alpha) F_C + F_L(\alpha) + F_C + (3 + F_L(\alpha) + F_C) (F_T + F_R)} \quad (10)$$

2 计及电网参数影响的触发延迟角

TCIPC 电感支路两端电压不仅是触发角 α 的函数,又受两侧电网等值参数的影响,而由 1.2.1 节的

分析,晶闸管的触发延迟角和电感支路两侧的电压有直接的关系。由于高压电网中电抗值远大于电阻值,即 $X \gg R$,可以近似忽略两侧网络等值参数中的电阻成分^[7]。在此条件下式(10)中的 A_{FS} 在触发延迟角的变化范围内恒为负实数。电感支路两端电压的幅值与等效电抗的值有关,而电压相角差与等效电抗的值无关,其大小与互联两侧电网的等值参数和 TC IPC的电容参数相关。令

$$V_T = (\sqrt{3}e^{j\phi} + F_C) E_a + [\sqrt{3}e^{-j/2} (F_T + F_R) - F_C e^{j2/3}] E_A \quad (11)$$

将式(11)与式(10)比较可得:

$$\phi = \text{angle}(V_T e^j) = \text{angle}(V_{AC}) \quad (12)$$

令 $\phi = -90^\circ + \phi$ 代入式(5)中得:

$$B_F(\phi) = \frac{1}{X_L} \left\{ 1 - \frac{2(\phi - 90^\circ)}{\sin[2(\phi - 90^\circ)]} - \frac{1}{\sin[2(\phi - 90^\circ)]} \right\} \quad (13)$$

由以上分析可知,当 TC IPC的电容参数以及两侧网络参数确定,即可确定晶闸管触发角与各参数

之间的关系,从而由 TC IPC电感支路等效电抗与联络线传输功率之间的关系确定有功功率和无功功率随触发延迟角的变化规律。

3 算例分析

算例以东北—华北电网之间交流弱联系为背景,虚拟降压运行(500 kV至220 kV)的联络线在绥中一侧装有 TC IPC。取电压基准值 $V_B = 220$ kV,视在功率基准 $S_B = 100$ MVA。根据东北调度中心要求,东北电网绥中节点通过联络线向华北电网输送的有功功率为60,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进行戴维南等值参数的求取^[8]。东北网等值电势 E_{eq1} 为1.109 0,等值电抗 X_{eq1} 为0.037 3;华北电网的等值电势 E_{eq2} 为1.053 8,等值电抗 X_{eq2} 为0.034。为满足运行要求,取电感值为0.1 H,电容值为18.9 μ F,以受端侧(华北电网侧)等值电源的电动势为参考电压,对两侧电源相角差分别为 $\delta = -30^\circ, -20^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ 进行计算,结果如表1所示。

表1 联络线潮流与 δ 值的关系

Tab 1 Relation between δ and power flow of tie-line

$\delta / (^\circ)$	136	146	156	166	176	186	196	206	216	226	
-30°	P	11.286 3	10.251 7	8.981 7	7.505	5.923 1	4.421 4	3.223 5	2.480 8	2.176 6	2.131 3
	Q	1.047 7	1.405 5	2.061 3	3.124 0	4.620 6	6.384 1	8.030 1	9.157 2	9.642 5	9.176
	$\delta / (^\circ)$	131	141	151	161	171	181	191	201	211	221
-20°	P	11.404	10.425	9.223 3	7.825 8	6.328 6	4.907 3	3.773 6	3.070 7	2.782 8	2.739 9
	Q	-0.350 9	0.019 9	0.721 3	1.827 8	3.524 2	5.476 4	7.305 8	8.561 2	9.102 2	9.184 1
	$\delta / (^\circ)$	129	139	149	159	169	179	189	199	209	219
-15°	P	11.333	10.393	9.239 1	7.897 3	6.459 7	5.095 1	4.006 6	3.331 7	3.055 3	3.014 1
	Q	-1.050 3	-0.676 3	0.043 1	1.240 2	2.953	4.990 8	6.903 8	8.218 1	8.784 7	8.870 6
	$\delta / (^\circ)$	121	131	141	151	161	171	181	191	201	211
$=0^\circ$	P	10.608	9.826 4	8.866 9	7.751 3	6.556 2	5.421 6	4.516 6	3.955 5	3.725 7	3.691 5
	Q	-3.085 5	-2.715 2	-1.962 4	-0.673 7	1.200 2	3.451 1	5.576 2	7.040 7	7.673	7.768 8
	$\delta / (^\circ)$	113	123	133	143	153	163	173	183	193	203
$=15^\circ$	P	9.159 8	8.59	7.890 5	7.077 2	6.205 8	5.378 7	4.718 9	4.309 8	4.142 3	4.142 3
	Q	-4.919 0	-4.572 3	-3.818 5	-2.487 3	-0.518 5	1.869 8	4.137 6	5.705 2	6.383 0	6.485 8
	$\delta / (^\circ)$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$=20^\circ$	P	8.532 2	8.042 4	7.441 1	6.742 0	5.993 0	5.282 0	4.714 9	4.363 3	4.219 2	4.197 8
	Q	-5.463 2	-5.128 6	-4.381 7	-3.047 8	-1.063 3	1.352 2	3.650 3	5.240 5	5.928 4	6.032 7
	$\delta / (^\circ)$	105	115	125	135	145	155	165	175	185	195
$=30^\circ$	P	7.087 4	6.768 2	6.376 3	5.920 7	5.432 5	4.969 2	4.599 6	4.370 4	4.276 5	4.262 5
	Q	-6.426 0	-6.121 1	-5.398 8	-4.077 0	-2.085 8	0.354 8	2.686 1	4.302 7	5.002 8	5.108 9

从表1数据结果中可以看出:两侧等值网络的电势相角差不同,直接影响 TC IPC电感支路的触发延迟角;随着触发延迟角 α 的增大,联络线上传输的有功功率由大到小变化,无功功率随着触发角的变化有可能改变传输方向,这需要注意和无功补偿

设备相配合才能满足系统运行的需要;通过调整 α 的变化,在一定范围内有功功率和无功功率能够连续进行调节;在互联两侧电网等值电动势相角差由滞后向超前变化的情况下,随着 α 的变化,有功功率的可调节范围减小,说明当 α 超前较多时,单纯

由电感支路参数的调节,联络线上传输的功率可能不一定满足要求,需要和其它参数以及网络进行协调控制。

通过带 IPC 联络线进行交流弱联系的电网,正常运行时,应该可以适应调度的需要,调控联络线潮流;发生较大扰动时,IPC 提供同步功率的能力比普通联络线弱^[8],为增强同步能力需要对联络线的功率进行控制,或者由于联络线功率波动,传输功率超过或接近稳定极限,也需要对联络线功率进行调整,而联络线功率的调控是基于晶闸管触发控制电感参数进行的,本例分析 TC IPC 触发控制角、电网等值参数以及联络线功率三者之间的内在关系及变化规律性对下一步设计联络线潮流控制策略具有实际指导意义。

4 结论

本文研究可控相间功率控制器(TCIPC)的基本结构模型和数学模型,将 TC IPC 联于实际电网中,分析计及电网等值参数影响下的 TC IPC 潮流控制特性,得出如下结论:

1) 高压电网中,基于交流弱互联的 TC IPC 电感支路晶闸管触发延迟角与两侧网络的等值参数和 TC IPC 的电容参数强相关。

2) 当两侧电网等值电源的相角差为定值时,TC IPC 所传输的有功功率随着触发延迟角的增大而减小,并且随着两侧等值电源相角差的增大,可调节的有功功率范围减小。

3) 在一定的范围内,通过控制 TC IPC 的触发角改变电感支路的等效参数,能够对潮流进行连续动态的控制。为进一步研究 TC IPC 与互联电网之间协调,以满足各种运行条件约束的联络线潮流控制奠定基础。

参考文献:

- [1] Brochu J, Pelletier P, Beaugard 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, HajMaharsi, Morin G, et al Simulator Demonstration of the Interphase Controller Technology [J]. IEEE Trans on PWRD, 1996, 11(4): 1985-1992
- [3] 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

- [4] 于继来,柳焯. 相间功率控制器的稳态分析及与移相器的特性比较 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 25-29.

YU Ji-lai, L U Zhuo Steady-state Analysis of Interphase Power Controller and Its Characteristic Comparison to Phase Shifter [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 25-29.

- [5] 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, L U Zhuo Circuit Analysis for the Mechanism of Interphase Power Controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 37-40.

- [6] 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.

J IANG Qi-rong, X I E Xiao-rong, C HEN Jian-ye Construction, Principle, Control and Application of Shunt Compensation for Power System [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

- [7] Ohtsuka K, Yokokawa S, Tanaka H, et al An Equivalent of Multimachine Power Systems and Its Identification for On-line Application to Decentralized Stabilizers [J]. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4(2): 687-693.

- [8] 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.

L I Juan, L U Xiu-kuan, L U Zhuo, et al Dynamic Behavior of IPC and Power System on Both Sides Considering the Variation of Load Frequency [J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(7): 71-75.

收稿日期: 2005-11-21; 修回日期: 2006-01-09

作者简介:

李娟(1972-),女,副教授,博士,研究方向为电力系统运行与控制以及 FACTS; E-mail: hitljzg@sohu.com

赵露(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制以及 FACTS;

柳焯(1929-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制以及 FACTS.

(下转第 62 页 continued on page 62)

- ZHOU Jia-qi, REN Zhen Power System Reliability Assessment[M]. Chongqing: Technology Press of Chongqing Branch, 1986
- [9] Schwan M, Wellssow W H, Koglin H J. Identification of Probability Distributions of Probabilistic Reliability Indices for Monetary Evaluation and Risk Assessment[A]. 14th PSCC. Sevilla: 2002 1-7.
- [10] Brown R E, Gupta S, Christie R D. Distribution System Reliability Assessment Using Hierarchical Markov Modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1929-1934.
- [11] van Casteren J. Assessment of Interruption Cost in Electric Power Systems Using the Weibull Markov Model[D]. Chalmers University of Technology, 2003.
- [12] 曹晋华,程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京:科学出版社, 1986
CAO Jin-hua, CHENG Kan Reliability Mathematics Theory[M]. Beijing: Science Press, 1986
- [13] 刘付显,刑清华. 预防维修决策分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(6): 44-46
- L U Fu-xian, XING Qing-hua The Decision Analysis of Preventive Maintenance[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(6): 44-46
- [14] Peman M, Senegacnik A, Tuma M. SemiMarkov Models with an Application to Power-Plant Reliability Analysis[J]. IEEE Trans on Reliability, 1997, 46(4): 526-532.
- [15] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al Reliability Test System for Educational Purposes Basic Distribution System Data and Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820

收稿日期: 2005-12-02; 修回日期: 2006-02-20

作者简介:

熊俊(1978-),男,硕士研究生,主要从事电能质量及电力市场的研究;E-mail: jun_xi@sohu.com

肖先勇(1968-),男,副教授,从事电力系统及自动化方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及电力市场。

A method of reliability cost assessment in distribution system based on SemiMarkov process

X DNG Jun, XAO Xian-yong
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper presents a general method of reliability cost assessment in distribution system which based on SemiMarkov process and aimed at the uncertainty of failure duration distribution. It gives a reliability assessment model for element longevity, preventive maintenance and repair time submitting to a random distribution, introduces customer interruption damage function and gives a calculation method of interruption cost in imperfect maintenance. Finally, it offers a simple system to testify its correctness and validity, reveals that it is compatible with the Homogenous Markov and Weibull Markov model, and could subtly reflect the effect of repair time on reliability cost indices.

Key words: distribution system; reliability; interruption; SemiMarkov; economic assessment

(上接第 45 页 continued from page 45)

Operation characteristic of thyristor controlled interphase power controller

LI Juan¹, ZHAO Lu¹, LU Zhuo²
(1. Northeast China Institute of Power Electric Engineering, Jilin 132012, China;
2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The basic construction and mathematical models of interphase power controller are studied. Thyristor Controlled Interphase Power Controller (TCIPC) can be formed by the control of thyristor to the equivalent inductor. Based on the weak AC interconnected power system connected by the TCIPC, the mathematical expression between trigger-delayed angle of thyristor and parameters of TCIPC as well as the Thevenin-equivalent parameters of interconnected networks is deduced. Furtherly, its operation characteristics are analyzed considering the influence of equivalent parameters of power networks. The results for the weak AC interconnected power system with TCIPC between Northeast and North China show that TCIPC can control the power flow of tie-line continuously and dynamically.

Key words: thyristor controlled interphase power controller; thyristor; trigger-delayed angle; equivalent parameters; operation characteristics