

文章编号:1000-582X(2004)12-0037-05

多端统一潮流控制器的建模分析*

管春^{1,2},吕厚余²,侯世英²,夏琦²

(1. 重庆邮电学院 通信与信息学院,重庆 400065; 2. 重庆大学 电气工程学院,重庆 400030)

摘要:在电力系统中,由同一母线向多端供电的情况并不少见,如果要对其进行综合潮流控制,可以用以下2种方法:一种是在供电端与各受电端间分别装设统一潮流控制器(UPFC),假设受电端有 n 个,则共需 n 台UPFC;另一种是在供电端与受电端间装设1台多端统一潮流控制器(M-UPFC)。现以二端统一潮流控制器(T-UPFC)(当 $n=2$ 时)为研究对象,首先介绍T-UPFC的结构及其工作原理,并且针对目前输出建模方法和拓扑建模方法的不足,通过引入开关函数的概念,建立可反映装置内部开关特性和运行机理的开关函数数学模型,较原有输出模型更具通用性。

关键词:灵活交流输电系统;统一潮流控制器;多端统一潮流控制器;二端统一潮流控制器

中图分类号:TM712

文献标识码:A

自1986年美国N. G. Hingorani博士提出灵活交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems 简称FACTS)以来,各种类型的FACTS元件应运而生,其中UPFC由于其强大的控制功能,一直在引起国内外学者的广泛关注。目前,对UPFC的研究一般从2个方面入手:1)UPFC自身的完善,如主电路结构、控制策略等方面的研究;2)UPFC在电力系统中的应用性研究。

在同一母线向多端供电的系统中,要对其进行综合潮流控制,可以用以下2种方法:1)在供电端与各受电端间分别装设UPFC,假设受电端有 n 个,则共需 n 台UPFC;2)在供电端与各受电端间装设1台M-UPFC。比较而言,第二种方式更加经济。加拿大的Bakari Mwinyiwiwa博士等学者对M-UPFC进行了深入研究,并制作了1台实验模型机验证了M-UPFC的可行性^[1-2]。目前,M-UPFC的建模方法主要有拓扑建模法和输出建模法。拓扑建模法主要根据装置在不同运行状态下不同的拓扑结构分析求出装置的解析方程,用这种方法所建立的模型的复杂程度将随开关数的增加呈指数增长,不易形成模型的统一表达式。输出建模法则较简单,它通常将装置等效为一个电流

源或电压源外接阻抗,再考虑装置本身的一些约束条件,从而得到一组联立方程,但输出建模法忽略了装置的内部信息。现以二端统一潮流控制器为研究对象,首先介绍T-UPFC的结构及其工作原理,然后引入开关函数的概念,建立T-UPFC的一般数学模型。

1 T-UPFC的结构

二端统一潮流控制器主要由1个并联逆变器及与其相连的并联变压器、2个串联逆变器及与其相连的串联变压器、1个直流电容器构成,用以控制2条线路的潮流。它是用于控制单线路潮流的统一潮流控制器的功能的延伸,在功能上相当于2台UPFC。

T-UPFC的结构示意图如图1所示。

2 T-UPFC的工作原理

图1中串联逆变器2、3交流侧产生的电压分别通过串联变压器 T_2 、 T_3 向线路I—J、I—K注入幅值和相位均可调的电压 V_2 、 V_3 ,电压 V_2 、 V_3 相当于2个交流电压源。注入电压源 V_2 、 V_3 可以向线路注入有功功率和无功功率,注入电压源的无功需求由逆变器自身产生,而有功需求则由并联逆变器1通过直流耦合送来。图

* 收稿日期:2004-08-10

基金项目:教育部高等学校重点实验室访问学者基金资助项目(03-12);重庆大学基础及应用基础研究资助项目(03-5)

作者简介:管春(1976-),男,四川达川人,重庆大学硕士,从事电力电子在电力系统中的应用研究。

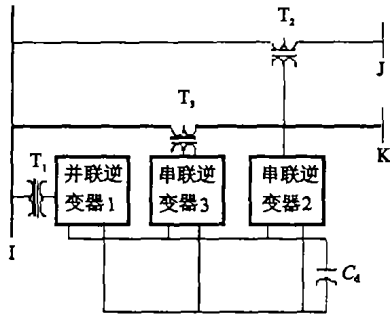


图1 T-UPFC的结构示意图

2为T-UPFC的电路原理图,其中 jX_2 、 jX_3 、 I_B 、 I_C 分别为线路I—J、I—K的线路阻抗、电流; jX_1 为并联控制支路的等效阻抗; V_1 、 V_2 、 V_3 分别为并联逆变器1、串联逆变器2、3的输出电压; V_A 、 I_A 分别为输电线路送端电压、电流; V_B 、 V_C 分别为受端J、K的电压; I_1 为并联控制支路上的电流。

在图2中,有以下等式成立:

$$V_A + V_2 - jX_2 I_B - V_B = 0 \quad (1)$$

$$V_A + V_3 - jX_3 I_C - V_C = 0 \quad (2)$$

$$V_A - V_1 - jX_1 I_1 = 0 \quad (3)$$

$$I_B + I_C + I_1 - I_A = 0 \quad (4)$$

根据有功平衡有以下等式成立:

$$\text{Re} al(V_1 I_1^*) = \text{Re} al(V_2 I_B^* + V_3 I_C^*) \quad (5)$$

$$\text{Re} al(V_A I_A^*) = \text{Re} al(V_B I_B^* + V_C I_C^*) \quad (6)$$

其中*表示取复数共轭值。

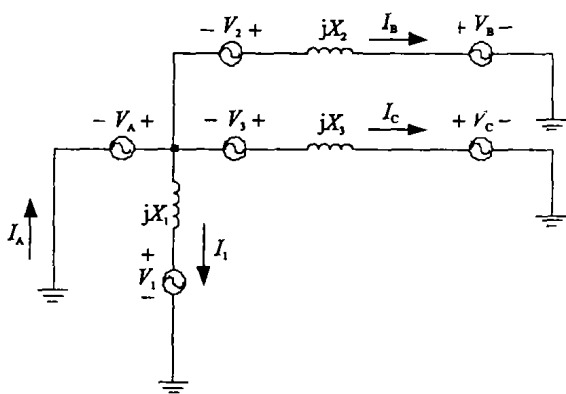


图2 T-UPFC的电路原理图

3 T-UPFC的一般模型

系统的数学模型是描述其静态和动态特性的信息集合,是分析和综合系统的基本出发点。目前,FACTS装置的建模方法主要有拓扑建模法和输出建模法。拓扑建模法主要根据装置在不同运行状态下不同的拓扑结构分析写出其微分方程,按整个装置具有多少种拓扑结构以及拓扑结构的转移顺序依次求解对应的微分方程组,从而求出装置的解析方程。用这种方法所建立的模型的复杂程度将随开关数的增加呈指数增长,

不易形成模型的统一表达式。输出建模法则较简单,它通常将装置等效为一个电流源或电压源外接阻抗,再考虑装置本身的一些约束条件,从而得到一组联立方程,但输出建模法忽略了FACTS装置的内部信息。文献[3-6]根据UPFC的电路结构,引入开关函数的概念,建立了UPFC的稳态和动态模型,在此基础上,笔者建立了二端统一潮流控制器的一般模型。

图3为图1所示的T-UPFC的等效电路图,其中 (V_{IA}, V_{IB}, V_{IC}) 、 (V_{JA}, V_{JB}, V_{JC}) 、 (V_{KA}, V_{KB}, V_{KC}) 分别为I、J、K端交流系统的等效电源; (L_{TI}, L_{TJ}, L_{TK}) 、 (R_{TI}, R_{TJ}, R_{TK}) 为对应串并联变压器的电感和电容; R_S 为开关元件导通时的等效电阻(理想状态下 $R_S = 0$); V_{DC} 为直流电容 C_d 两端的电压; S_{mi1} 和 S_{mi2} ($m = I, J, K; i = 1, 2, 3$)是等效开关元件。

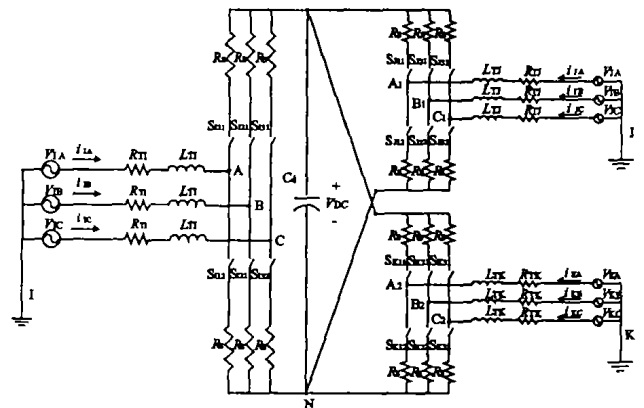


图3 T-UPFC的等效原理图

由于 S_{mi1} 和 S_{mi2} ($m = I, J, K; i = 1, 2, 3$)是逆变器同一桥臂的开关元件,两者不能同时导通,为此可以引入开关函数 K_{mi}, \bar{K}_{mi} 令:

$$\begin{cases} K_{mi} = 1, \bar{K}_{mi} = 0 & \text{当 } S_{mi1} \text{ 导通, } S_{mi2} \text{ 关断时} \\ K_{mi} = 0, \bar{K}_{mi} = 1 & \text{当 } S_{mi1} \text{ 关断, } S_{mi2} \text{ 导通时} \end{cases} \quad (7)$$

首先,取I端A相进行分析有下式(8)成立:

$$L_{TI} \frac{d(i_{IA})}{dt} = V_{IA} - R_{TI} i_{IA} - V_{AN} - V_{NI} \quad (8)$$

其中有:

$$V_{AN} = \begin{cases} R_S i_{IA} + V_{DC} & \text{当 } S_{I11} \text{ 导通, } S_{I12} \text{ 关断时} \\ R_S i_{IA} & \text{当 } S_{I11} \text{ 关断, } S_{I12} \text{ 导通时} \end{cases} \quad (9)$$

可以将式(9)简化写为下式(10):

$$V_{AN} = R_S i_{IA} + K_{I1} V_{DC} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)得:

$$L_{TI} \frac{d(i_{IA})}{dt} = - (R_{TI} + R_S) i_{IA} + V_{IA} - K_{I1} V_{DC} - V_{NI} \quad (11)$$

同理,对I端B相有下式(12)成立:

$$L_{T1} \frac{d(i_{IB})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IB} + V_{IB} - K_{L2} V_{DC} - V_{N1} \quad (12)$$

对 I 端 C 相有下式(13)成立:

$$L_{T1} \frac{d(i_{IC})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IC} + V_{IC} - K_{L3} V_{DC} - V_{N1} \quad (13)$$

对于三相平衡系统有:

$$V_{IA} + V_{IB} + V_{IC} = 0 \quad (14)$$

对于无中线的三相系统有:

$$i_{IA} + i_{IB} + i_{IC} = 0 \quad (15)$$

将式(11)、(12)、(13)相加后再把式(14)、(15)

代入得到式(16):

$$V_{N1} = - \frac{V_{DC}}{3} \sum_{j=1}^3 K_{Lj} \quad (16)$$

将式(16)分别代入式(11)、(12)、(13)有:

$$L_{T1} \frac{d(i_{IA})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IA} + V_{IA} - \left(K_{L1} - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 K_{Lj} \right) V_{DC} \quad (17)$$

$$L_{T1} \frac{d(i_{IB})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IB} + V_{IB} - \left(K_{L2} - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 K_{Lj} \right) V_{DC} \quad (18)$$

$$L_{T1} \frac{d(i_{IC})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IC} + V_{IC} - \left(K_{L3} - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 K_{Lj} \right) V_{DC} \quad (19)$$

同理,对于 J、K 端也可得出其表达式。

对于直流电容器 C_d 有下式(20)成立:

$$C_d \frac{d(V_{DC})}{dt} = K_{L1} i_{IA} + K_{L2} i_{IB} + K_{L3} i_{IC} + K_{J1} i_{JA} + K_{J2} i_{JB} + K_{J3} i_{JC} + K_{K1} i_{KA} + K_{K2} i_{KB} + K_{K3} i_{KC} \quad (20)$$

针对不同的变换器调制方法,可以得到其开关函数表达式,从而得到该装置的一般模型,这就是引入开关函数的好处。图 4 为现有 FACTS 器件广泛采用的一种变换器调制方法:脉宽调制(Pulse-width Modulation 简称 PWM)方法的示意图,图中画出的是对 I 端 A 相开关元件的控制,其中(a)为 I 端 A 相的 PWM 调制示意图,(b)为一个开关周期内的开关函数 K_{L1} 及其平均值。

图 4 中, ω 为逆变器 1 的输出电压基波角频率,也称为调制角频率, ω_s 为开关角频率,也称为载波角频率, \bar{d}_{L1} 为开关函数 K_{L1} 分别在各个开关周期内的平均值,假设在每个开关周期内开关元件的开关切换点是

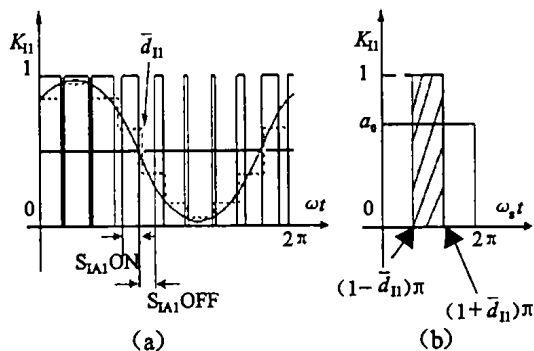


图 4 PWM 控制下的开关函数波形

对称的,如图 4(b)所示。

开关函数 K_{L1} 是离散型的周期函数,可用傅立叶级数表示为:

$$K_{L1} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega t) \quad (21)$$

其中:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{(1-\bar{d}_{L1})\pi}^{(1+\bar{d}_{L1})\pi} d(\omega_s t) = \bar{d}_{L1} \quad (22)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{(1-\bar{d}_{L1})\pi}^{(1+\bar{d}_{L1})\pi} \cos(n\omega_s t) d(\omega_s t) = (-1)^n \frac{2}{n\pi} \sin(n\pi \bar{d}_{L1}) \quad (23)$$

图 5 描绘了 \bar{d}_{L1} 在基频下的变化情况,其基频分量 d_{L1} 由下式(24)表示:

$$d_{L1} = \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \delta_1) + \frac{1}{2} \quad (24)$$

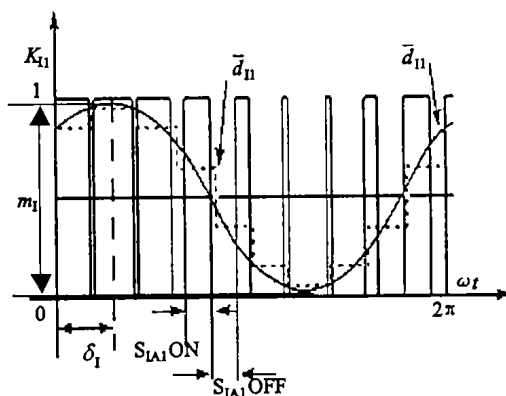


图 5 开关函数平均值 \bar{d}_{L1} 的基频分量 d_{L1}

结合式(10)、(16)、(21—24)有:

$$V_{AN} = R_S i_{IA} + \frac{m_1 V_{DC}}{2} \cos(\omega t - \delta_1) + \frac{1}{2} V_{DC} = R_S i_{IA} + A_1 \cos\theta_1 + \frac{1}{2} V_{DC} \quad (25)$$

$$V_{N1} = - \frac{1}{2} V_{DC} \quad (26)$$

则式(11)变形为:

$$L_{T1} \frac{d(i_{IA})}{dt} = - (R_{T1} + R_S) i_{IA} - A_1 \cos\theta_1 + V_{IA} =$$

$$-R_I i_{IA} - E_{IA} + V_{IA} \tag{27}$$

综合以上分析,T-UPFC 可以用以下矩阵方程式(28)表示:

$$Z\dot{X} = AX + C \tag{28}$$

其中:

$$X = [i_{IA} \ i_{IB} \ i_{IC} \ I_{JA} \ i_{JB} \ i_{JC} \ i_{KA} \ i_{KB} \ i_{KC} \ V_{DC}]^T \tag{29}$$

$$Z = \begin{bmatrix} L_{TI} & & & & & & & & & & \\ & L_{TI} & & & & & & & & & \\ & & L_{TI} & & & & & & & & \\ & & & L_{TJ} & & & & & & & \\ & & & & L_{TJ} & & & & & & \\ & & & & & L_{TJ} & & & & & \\ & & & & & & L_{TK} & & & & \\ & & & & & & & L_{TK} & & & \\ & & & & & & & & L_{TK} & & \\ & & & & & & & & & L_{TK} & \\ & & & & & & & & & & C_d \end{bmatrix} \tag{30}$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_J & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_J & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_J & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_K & 0 & 0 \\ K_{I1} & K_{I2} & K_{I3} & K_{J1} & K_{J2} & K_{J3} & K_{K1} & K_{K2} & K_{K3} & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{31}$$

$$R_I = R_S + R_{TI}, R_J = R_S + R_{TJ}, R_K = R_S + R_{TK} \tag{32}$$

$$C = \begin{bmatrix} V_{IA} - E_{IA} \\ V_{IB} - E_{IA} \\ V_{IC} - E_{IA} \\ V_{JA} - E_{IA} \\ V_{JB} - E_{IA} \\ V_{JC} - E_{IA} \\ V_{KA} - E_{IA} \\ V_{KB} - E_{IA} \\ V_{KC} - E_{IA} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{33}$$

$$E_{mA} = \frac{m_m V_{DC}}{2} \cos(\omega t - \delta_m); (m = I, J, K) \tag{34}$$

$$E_{mB} = \frac{m_m V_{DC}}{2} \cos(\omega t - \delta_m - \frac{2}{3}\pi); (m = I, J, K) \tag{35}$$

$$E_{mC} = \frac{m_m V_{DC}}{2} \cos(\omega t - \delta_m + \frac{2}{3}\pi); (m = I, J, K) \tag{36}$$

令:

$$i_{mDC} = K_{m1} i_{mA} + K_{m2} i_{mB} + K_{m3} i_{mC}; (m = I, J, K) \tag{37}$$

则式(20)变形为:

$$C_d = \frac{d(V_{DC})}{dt} = i_{IDC} + i_{JDC} + i_{KDC} \tag{38}$$

综合式(28)与式(38),可得出二端统一潮流控制器 T-UPFC 的一般数学模型如图 6 所示。

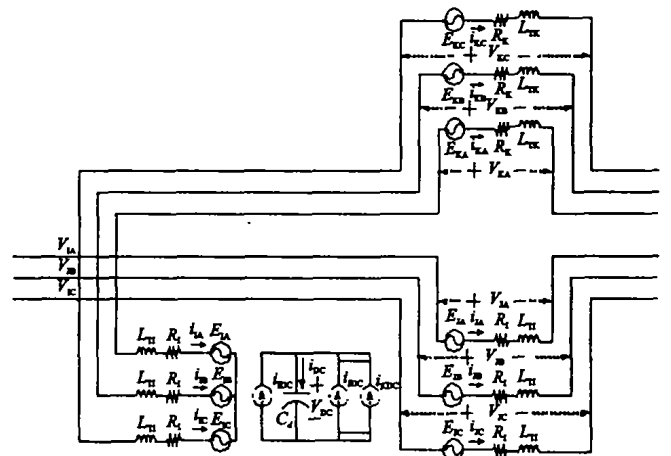


图 6 二端统一潮流控制器的一般数学模型

4 结论

文中介绍了多端统一潮流控制器的结构、工作原理,并且引入开关函数的概念,以二端统一潮流控制器 T-UPFC 为研究对象,建立了 T-UPFC 的一般模型。多端统一潮流控制器主要由 1 个并联逆变器及与其相连的并联变压器、n 个(n ≥ 2)串联逆变器及与其相连的串联变压器、1 个直流电容器构成,用以控制多条线路的潮流,它是用于控制单线路潮流的统一潮流控制器的功能的延伸,在功能上,相当于 n 台统一潮流控制器。开关函数的引入弥补了拓扑建模法和输出建模法的缺点,本节采用了该方法,从而建立了二端统一潮流控制器的一般模型,同理,多端统一潮流控制器的模型也可以用这样的方法得出。

参考文献:

- [1] MWINYIWIWA B, LU B, OOI B T. Multiterminal Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Tran on PWRD, 2000, 15(6):1 088 - 1 093.
- [2] MWINYIWIWA B, LU B, OOI B T, et al. Multi-terminal UPFC for Power System Dregulation[J]. IEEE, 2000, 4(5):2 916 - 2 921.
- [3] NABAVI N A, IRAVANI M R. Steady-state and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies[J]. IEEE Tran on PWRD, 1996, 11(4): 1 937 - 1 943.
- [4] BEER A. Transformerless Reactive Series Compensator with Voltage-source Inverters for Power Flow Control[D]. Switzerland: Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich, 2001. 2 - 13.
- [5] 李岩松. 基于统一潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 1999. 6 - 15.
- [6] 戚庆茹, 焦连伟, 严正, 等. 统一潮流控制器的动态相量建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 10 - 14.

Modelling and Analysis of Multi-terminal Unified Power Flow Controller

GUAN Chun^{1,2}, LU Hou-yu², HOU Shi-ying², XIA Qi²

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To control the complex powers emanating from a bus in power system, there are two solutions. The obvious solution is to equip each of the n lines radiating from the node with its own UPFC. The next evolution of the idea is to equip with a multi-terminal UPFC. First, the configuration and the principle of the Two-terminal UPFC (when $n = 2$) are presented. In consideration of the existing shortages of output model-constructing method and topological model-constructing method for T-UPFC, a switching function mathematical model of this device is constructed by introducing the concept of switching function. It has more generality than the output and the topological model with the consideration of the internal switching character and the physical course of the T-UPFC.

Key words: flexible AC transmission systems; unified power flow controller; multi-terminal unified power flow controller; two-terminal unified power flow controller

(编辑 李胜春)