

基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型

李 勋, 杨荫福, 陈 坚

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 针对目前统一潮流控制器(UPFC)输出建模方法和拓扑建模方法的不足,通过引入正弦脉宽调制(SPWM)控制下的开关函数概念,建立可反映 UPFC 装置内部开关特性和运行机理的基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型。该模型清晰地指出了 UPFC 最终的输入控制量和输出量,并考虑了串、并联变压器的不同变比及三相电网电压的不平衡,较原有输出模型更具一般性。

关键词: 统一潮流控制器; 正弦脉宽调制; 开关函数; 数学模型

中图分类号: TM761

0 引言

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出发点。因此,建立一个更具一般性、能详细反映统一潮流控制器(UPFC)性质和内部特征的数学模型,对于促进 UPFC 的研究有着积极的意义。目前,UPFC 建模的方法主要有两种:输出建模法及拓扑建模法^[1]。前者相对简单,但由于将 UPFC 的两个变流器等效为理想的电压源和电抗,因此不能反映 UPFC 内部的开关特性及运行机理;后者所建立的模型的复杂程度会随着拓扑结构的复杂程度而呈指数增长,不易建立统一的模型表达式。国内对于 UPFC 模型的研究主要集中在输出建模方法上,当然,也有学者对开关函数建模法进行了探讨^[2,3],提出了基于开关函数调节及空间矢量控制的建模方法,但考虑的因素不够全面,不具一般性。

本文通过引入正弦脉宽调制(SPWM)控制下的开关函数概念,提出基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型。此模型反映了 UPFC 装置内部开关特性和运行机理,考虑了串、并联变压器的不同变比及三相电网电压的不平衡,较原有输出模型更具一般性。通过调节串、并联变流器电压调制比及调制正弦波初始相位角,实现对 UPFC 输出量的控制。

1 UPFC 工作原理^[4]

图 1 所示为 UPFC 装置的单相结构框图。整个装置由并联变压器 TP、串联变压器 TS、两个电压型变流器及直流侧并联电容 C 组成。图中 X_L 为传输线路电抗(忽略了线路电阻)。变流器 VSC1 通过并联变压器 TP 接入系统,其主要作用是平衡 UPFC 内部的有功功率,以维持直流侧电容电压 v_{dc} 恒定。

此外,VSC1 还具有独立的无功功率补偿作用。变流器 VSC2 通过串联变压器 TS 接入系统,向系统提供一个幅值和相位可调的串联电压 v_{pqa} ,其基本作用在于控制线路上通过的有功功率和无功功率。

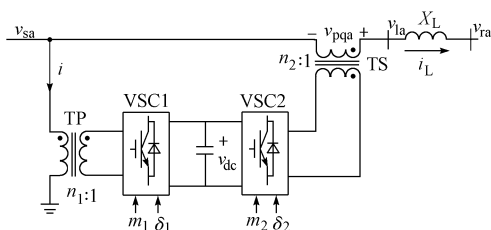


图 1 UPFC 结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of UPFC

总之,两个变流器可以独立地发出或吸收无功功率,正常运行时不发出或吸收有功功率,直流侧电容起到了能量存储和功率传输的作用。图 1 中, m_1 , δ_1 和 m_2 , δ_2 分别代表并联变流器和串联变流器的电压幅值和相位角控制信号,调节 m_1 , δ_1 和 m_2 , δ_2 就可以实现对 UPFC 输出量的控制。

2 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型的建立

2.1 UPFC 主电路结构

目前,实用的 UPFC 装置主电路一般采用由全控器件 GTO 构成的三相桥式结构,图 2 给出了其详细的电路原理。图 2 中,只考虑变流器输出交流电压的基波分量,因此忽略了两变流器的输出谐波滤波器。串、并联变流器具有不同的变比,均采用星形接法的三相芯式变压器; r_1 , l_1 及 r_2 , l_2 分别代表并联变压器 TP 及串联变压器 TS 每相的漏阻和漏感; r_s 代表 GTO 导通状态下的电阻,即变流器开关的导通损耗; T_{1i} , T_{2i} ($i=1,2,\dots,6$) 分别是并联侧和串联侧变流器的理想开关器件。

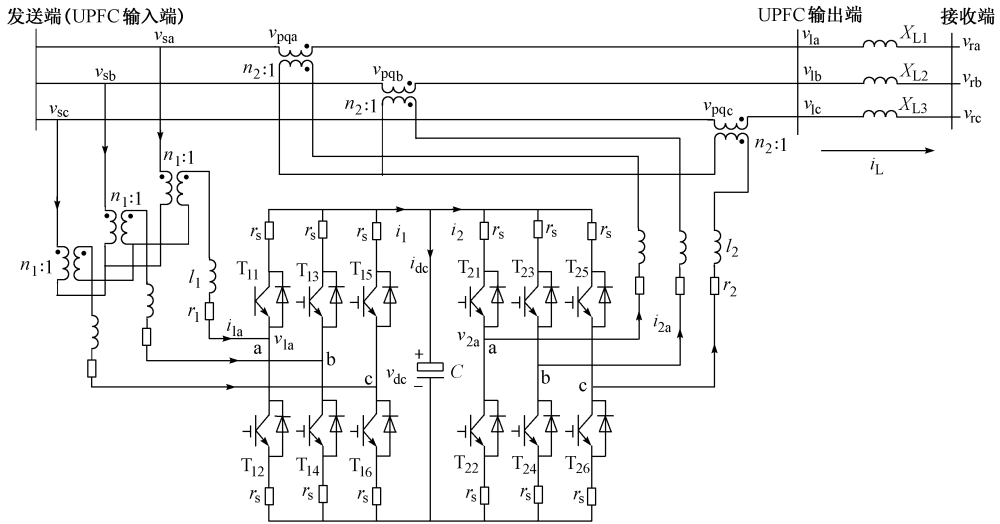


图2 UPFC 电路原理

Fig. 2 Detailed three-phase UPFC circuit diagram

2.2 SPWM 控制下的开关函数

图2中,对于SPWM控制下的两个变流器,同一桥臂的两个开关器件交替导通,因此引入开关函数 S ,定义如下:

$S=1$,代表对应桥臂中的上管导通,下管关断;
 $S=0$,代表对应桥臂中的下管导通,上管关断。

设系统基波与载波角频率分别为 ω, ω_s ,由SPWM控制规律可知,在一个系统基波周期内的开关函数波形如图3(a)所示(以并联侧变流器a相桥臂 S_{1a} 为例)。

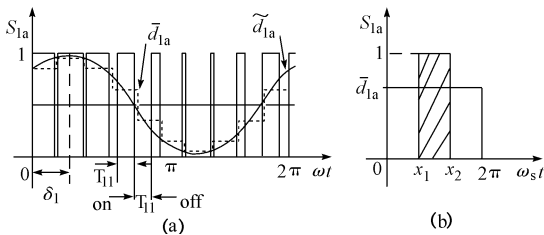


图3 SPWM 控制下的开关函数波形

Fig. 3 Waveform of switching function under the control of SPWM

可见,在一个系统基波周期内,开关函数表现为不断的导通和关断状态,且导通/关断时间随着SPWM的调制而变化。在一个开关周期内, S_{1a} 的波形如图3(b)所示,由面积等效原理可知,在一个开关周期内 S_{1a} 的平均值 $\bar{d}_{1a} = (x_2 - x_1) / (2\pi)$ 。因此,对 S_{1a} 在整个系统的基波周期内取平均值,就可得到 S_{1a} 在整个系统的基波周期内的连续阶梯形曲线,如图3(a)中的虚线 $\bar{d}_{1a}$ 所示。当只考虑 $\bar{d}_{1a}$ 的基波分量时,根据SPWM控制规律,由图3(a)可得到 S_{1a} 的交变分量 $\tilde{d}_{1a}$:

$$\tilde{d}_{1a} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \delta_1) \quad (1)$$

显然, $\tilde{d}_{1a}$ 中包含直流分量和基波分量两部分。

由于只考虑开关函数连续阶梯形曲线的基波分量,因此,并联侧变流器b相和c相的开关函数交变分量相对a相而言,只是依次滞后 120° 和 240° ,即:

$$\tilde{d}_{1b} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos\left(\omega t - \delta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$\tilde{d}_{1c} = 0.5 + \frac{m_1}{2} \cos\left(\omega t - \delta_1 - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3)$$

同理,对于串联侧变流器各相的开关函数也有类似的交变结果表达式。

2.3 UPFC 装置的数学建模

根据图2,利用基尔霍夫电压、电流定律,并引入开关函数 S ,可以得到关于并联侧变流器的一组方程式:

$$\frac{v_{sa}}{n_1} - i_{1a}r - l_1 \frac{di_{1a}}{dt} - S_{1a}v_{dc} =$$

$$\frac{v_{sb}}{n_1} - i_{1b}r - l_1 \frac{di_{1b}}{dt} - S_{1b}v_{dc} =$$

$$\frac{v_{sc}}{n_1} - i_{1c}r - l_1 \frac{di_{1c}}{dt} - S_{1c}v_{dc} \quad (4)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} = i_1 - i_2 =$$

$$S_{1a}i_{1a} + S_{1b}i_{1b} + S_{1c}i_{1c} - i_2 \quad (5)$$

式中: C 为直流侧并联电容; $r=r_1+r_s$ 。

考虑到变压器是星形连接,系统无中线,三相电流之和始终为0,即:

$$i_{1a} + i_{1b} + i_{1c} = 0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),则有:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1a} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sa} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - \left(S_{1a} - \frac{S_{1a} + S_{1b} + S_{1c}}{3}\right)v_{dc}\right] \\ \frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1b} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sb} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - \left(S_{1b} - \frac{S_{1a} + S_{1b} + S_{1c}}{3}\right)v_{dc}\right] \\ \frac{di_{1c}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1c} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sc} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - \left(S_{1c} - \frac{S_{1a} + S_{1b} + S_{1c}}{3}\right)v_{dc}\right] \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,当 $v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} \neq 0$ 时,表明系统三相电网电压不平衡或包含谐波分量。若考虑三相电网电压是平衡的,则有 $v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0$ 。

引入 SPWM 控制下的开关函数,用开关函数的交变分量 $\tilde{a}_{1a}$, $\tilde{a}_{1b}$ 及 $\tilde{a}_{1c}$ 分别代替式(7)、式(5)中的 S_{1a} , S_{1b} 和 S_{1c} ,即在式(7)和式(5)中代入式(1)~式(3),则可得到 SPWM 控制下的 UPFC 并联侧变流器的一组方程:

$$\begin{cases} \frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1a} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sa} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - v_{1c}\cos\theta_1\right] \\ \frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1b} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sb} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - v_{1c}\cos\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ \frac{di_{1c}}{dt} = -\frac{r}{l_1}i_{1c} + \frac{1}{l_1}\left[\frac{1}{n_1}\left(v_{sc} - \frac{v_{sa} + v_{sb} + v_{sc}}{3}\right) - v_{1c}\cos\left(\theta_1 - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}\left(\sum_{i=a,b,c}\tilde{a}_{1i}i_{1i} - i_2\right) \quad (9)$$

式中: $v_1 = m_1 v_{dc}/2$; $\theta_1 = \omega t - \delta_1$ 。

同理,根据图 2,运用以上方法,也可以得到 SPWM 控制下的 UPFC 串联侧变流器的一组方程:

$$\begin{cases} \frac{di_{2a}}{dt} = -\frac{R}{l_2}i_{2a} - \frac{1}{l_2}\left[n_2\left(v_{pqa} - \frac{v_{pqa} + v_{pqb} + v_{pqc}}{3}\right) - v_2\cos\theta_2\right] \\ \frac{di_{2b}}{dt} = -\frac{R}{l_2}i_{2b} - \frac{1}{l_2}\left[n_2\left(v_{pqb} - \frac{v_{pqa} + v_{pqb} + v_{pqc}}{3}\right) - v_2\cos\left(\theta_2 - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ \frac{di_{2c}}{dt} = -\frac{R}{l_2}i_{2c} - \frac{1}{l_2}\left[n_2\left(v_{pqc} - \frac{v_{pqa} + v_{pqb} + v_{pqc}}{3}\right) - v_2\cos\left(\theta_2 - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_1 - \sum_{i=a,b,c}\tilde{a}_{2i}i_{2i}\right) \quad (11)$$

式中: $R = r_2 + r_s$; $v_2 = m_2 v_{dc}/2$; $\theta_2 = \omega t - \delta_2$ 。

综合式(9)和式(11),得到 UPFC 直流侧的等式:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}\left(\sum_{i=a,b,c}\tilde{a}_{1i}i_{1i} - \sum_{i=a,b,c}\tilde{a}_{2i}i_{2i}\right) \quad (12)$$

综上所述,式(8)、式(10)、式(12)就构成了 SPWM 控制下的 UPFC 开关函数数学模型。

3 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型的分析

由式(8)和式(10)可知,由于三相电网电压不平衡,串联、并联变流器各方程式之间存在耦合关系。

基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型准确地描述了 UPFC 内部的开关特性和运行机理,根据此模型,运用诸如 MATLAB 等仿真软件进行时域仿真数值计算,就能得出 UPFC 随时间变化的暂态过程。外部系统对 UPFC 的作用通过电压源 v_{sa} , v_{sb} , v_{sc} 及 v_{pqa} , v_{pqb} , v_{pqc} 的变化来反映;而对 UPFC 的控制则通过交变的开关函数 $\tilde{a}_{1a}$, $\tilde{a}_{1b}$, $\tilde{a}_{1c}$, $\tilde{a}_{2a}$, $\tilde{a}_{2b}$, $\tilde{a}_{2c}$ (即两变流器的控制量 $m_1, \delta_1, m_2, \delta_2$)来实现。以并联侧为例,由式(8)可见,改变 m_1, δ_1 ,相应地就改变了变流器 VSC1 输出电压的大小与相位,在电压源 v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} 的共同作用下,导致输出电流 i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} 的改变,进而实现并联侧逆变器的无功补偿及有功平衡作用。因此,根据 SPWM 控制下的 UPFC 开关函数数学模型,可以得到 UPFC 的最终控制量就是并联侧变流器和串联侧变流器的电压调制比及调制正弦波初始相位角,各种 UPFC 的控制目标最终要转变为对 $m_1, \delta_1, m_2, \delta_2$ 的控制。控制的输出结果就是改变两个变流器的各相电流,从而实现控制目标。

式(12)表明,两变流器之间存在很强的交互作用,这种作用是通过它们对直流侧电容的共同影响来反映的,因此,在设计 UPFC 系统时应注意两个变流器之间的协调控制。

4 结语

本文分析了 SPWM 控制下的开关函数,得出了开关函数的交变分量表达式,提出了基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型,建立了 UPFC 并联侧和串联侧变流器及直流侧电容的方程式,指出了 UPFC 最终的输入控制量及输出量,通过调节变流器的电压调制比和初始相位角,实现了对 UPFC 输出量的控制。此数学模型考虑了串、并联变压器的不同变比及三相电网电压的不平衡,较一般的输出模

型更具一般性和统一性,而且准确地反映了 UPFC 内部的开关特性和运行机理。

参考文献

- 1 孙元章,刘前进(Sun Yuanzhang, Liu Qianjin). FACTS 控制技术综述——模型、目标与策略(A Summary of FACTS Control Technology——Model, Objective and Strategy). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(6): 1~7
- 2 郝正航,冯 丽,许克明(Hao Zhenghang, Feng Li, Xu Keming). UPFC 装置的“开关函数”建模法(The Switching Function Model——Constructing Method of UPFC). 贵州工业大学学报(自然科学版)(Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)), 2000, 29(3): 39~43
- 3 李岩松,郭家骥,刘 君(Li Yansong, Guo Jiaji, Liu Jun). UPFC

暂态数学模型及其应用(Mathematics Model of UPFC During Transient and Its Application). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(21): 31~34

- 4 Gyugyi L. The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 1085~1097

李 勤(1976—),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术
技术在电力系统中的应用。E-mail: lxlj@mail.hust.edu.cn

杨荫福(1946—),女,教授,研究领域为电力电子变换及其控制技术。

陈 坚(1935—),男,教授,博士生导师,研究领域为电力电子变换和控制技术、电力传动基本理论和控制技术。

SWITCHING FUNCTION MATHEMATICAL MODEL OF UPFC BASED ON SPWM CONTROL

Li Xun, Yang Yinfu, Chen Jian (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In consideration of the existing shortages of output model-constructing method and topological model-constructing method for UPFC, a switching function mathematical model of this device based on SPWM control is constructed by introducing the concept of switching function under SPWM control. The model reflects the internal switching character and the physical course of UPFC, and distinctly indicates the final input controlled variables and output variables of UPFC. It has more generality than the output model with the consideration of the different ratio of series-shunt transformer and unbalance of three-phase network voltage.

Key words: UPFC; SPWM; switching function; mathematical model