

# UPFC 的运行状态分析与数学建模

侯丽,刘琦

(黄山学院 信息工程学院, 安徽 黄山 245021)

**摘要:**针对UPFC运行状态进行分析的基础上,基于UPFC的等值单线电路,建立了基于 $dg$ 旋转坐标系下UPFC的数学模型,该数学模型较具普遍性,可方便对UPFC进行分析和控制。

**关键词:**UPFC;等值单线电路; $dg$ 坐标;数学模型

**中图分类号:**TM712 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-447X(2010)04-0019-03

## 0 引言

统一潮流控制器 UPFC (Unified Power Flow Controller) 是灵活交流输电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System)的重要组成部分,为现代电力系统的安全稳定运行提供了有效途径,因而对 UPFC 的研究具有重要意义。目前对 UPFC 的研究主要集中在数学建模和控制策略上。针对 UPFC 的数学建模,主要有拓扑建模法、输出建模法和开关函数建模法。本文基于 UPFC 的等值单线电路,建立了基于  $dg$  旋转坐标系下 UPFC 的数学模型,该数学模型较具普遍性,可方便对 UPFC 进行分析和控制。

## 1 UPFC 的运行状态的分析

UPFC 通常安装在变电所的出线侧,其装置由两个共用直流侧电容的电压源逆变器 VSI(Voltage Source Inverter)组成,并联侧 VSI<sub>1</sub> 通过降压变压器和系统母线相连,串联侧 VSI<sub>2</sub> 通过升压变压器串联接入系统。

### 1.1 并联侧的运行状态分析

UPFC 并联侧的等值单线电路如图 1 所示,

$Z_1=R_1+j\omega L_1$ ,为 UPFC 并联侧等值阻抗。

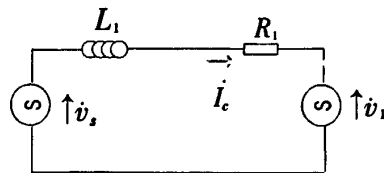


图 1 UPFC 并联侧的等值单线电路

从图 1 可得注入并联侧 VSI<sub>1</sub> 的电流如式(1)所示:
$$i_c = \frac{V_s - V_1}{Z_1} \quad (1)$$

由式(1)可推导出 UPFC 并联侧从发送端母线吸收的有功功率  $P_1$  和无功功率  $Q_1$  分别由式 (2),(3) 所示:

$$P_1 = \sqrt{3} V_s I_c \cos\phi \quad (2)$$

$$Q_1 = \sqrt{3} V_s I_c \sin\phi \quad (3)$$

式中  $\phi$  为发送端母线电压  $\dot{V}_s$  和并联侧电流  $\dot{I}_c$  的相位差。

当改变 UPFC 并联侧 VSI<sub>1</sub> 输出交流电压  $\dot{V}_1$  的幅值和相位时,注入并联侧 VSI<sub>1</sub> 的电流  $\dot{I}_c$  的幅值和相位随之改变,从而改变 UPFC 并联侧从发送端母线吸收的有功功率和无功功率,也就决定了 UPFC 并联侧的工作状态。

### 1.2 串联侧的运行状态分析

UPFC 串联侧以及线路的等值单线电路如图 2

收稿日期:2010-02-28

基金项目:黄山学院自然科学研究项目(2007xkjq007)

作者简介:侯 丽(1981-),黄山学院信息工程学院讲师,研究方向为电力电子技术在电力系统稳定控制中的应用。

所示,  $Z=R+j\omega L$  为线路的等效阻抗。

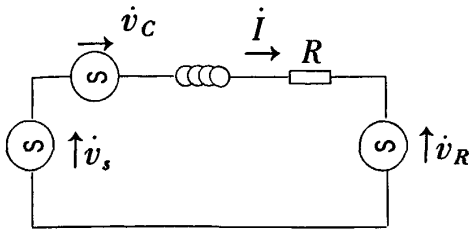


图 2 UPFC 串联侧以及线路的等值单线电路

通过调节串联变压器输出电压  $V_c$  的幅值和相位可实现以下功能:

1. 线路潮流的控制。可通过调节串联变压器输出电压  $V_c$  的幅值和相位来实现线路潮流的控制。

2. 串联电压补偿。调节串联侧注入电压  $V_c$  的相位, 使 UPFC 出线端电压  $V_o$  的相位与线路发送端电压  $V_s$  的相位一致, 再调节  $V_c$  的幅值, 即可调节 UPFC 出线侧电压  $V_o$  的幅值, 从而实现串联电压补偿。

3. 静止移相器。通过调节串联电压  $V_c$ , 使 UPFC 出线侧电压  $V_o$  的幅值与线路侧发送端电压  $V_s$  的幅值相同, 而相位移动, 即相当于静止移相器的调节功能。

4. 串联阻抗补偿。通过调节串联电压  $V_c$ , 使之与线路电流  $I$  的相位垂直, 其效果相当于在线路中串联可调电抗, 从而实现串联阻抗补偿的功能。

## 2 UPFC 的数学建模

UPFC 的等值模型<sup>[1,2]</sup>如图 3 所示, 忽略由于半导体器件、变压器饱和以及控制器的时延引起的非线性。

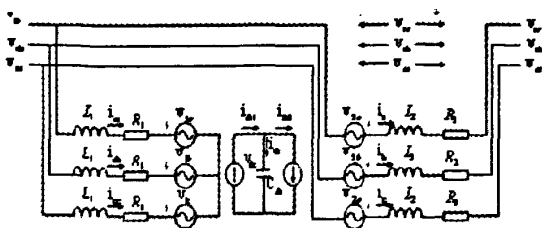


图 3 UPFC 等值模型

以发送端母线电压  $v_s$  为参考矢量, 为了控制需要, 采用在  $dq$  旋转坐标系下建立并联侧, 串联侧和直流侧的数学模型。

### 2.1 并联侧数学建模

基于图 1 的 UPFC 并联侧的单线等值电路, 可得  $dq$  旋转坐标系下的 UPFC 并联侧数学模型 (用瞬时值表示), 如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} v_{sd}-v_{1d} \\ v_{sq}-v_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \frac{d}{dt} R_1 & -\omega L_1 \\ \omega L_1 & L_1 \frac{d}{dt} + R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $L_1$  和  $R_1$  分别表示 UPFC 并联侧的变压器以及所连接电抗的等效电感和电阻,  $i_c$  为 UPFC 并联侧的输出电流,  $v_s$  为发送端母线电压,  $v_1$  为 UPFC 并联侧逆变器交流侧电压。

定义瞬时复功率<sup>[3]</sup>  $S=3\dot{V}\dot{I}^*$ , 则 UPFC 并联侧从发送端母线吸收的有功  $P_1$ 、无功功率  $q_1$  分别如式(5),(6)所示:

$$P_1 = \frac{3}{2} (v_{sd}i_{cd} + v_{sq}i_{cq}) \quad (5)$$

$$q_1 = \frac{3}{2} (v_{sq}i_{cd} - v_{sd}i_{cq}) \quad (6)$$

### 2.2 串联侧数学建模

基于图 2 的 UPFC 串联侧以及线路的单线等值电路, 可得  $dq$  旋转坐标系下的 UPFC 串联侧数学模型(用瞬时值表示), 如式(7)所示:

$$\begin{bmatrix} v_{sd}+v_{cd}-v_{Rd} \\ v_{sq}-v_{cq}-v_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{d}{dt} R & -\omega L \\ \omega L & L \frac{d}{dt} + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $L$  和  $R$  分别表示线路的等效电感和电阻,  $i$  为线路及 UPFC 串联侧流过的电流,  $v_c$  为 UPFC 串联侧注入电压,  $v_s$  为线路发送端母线电压,  $v_R$  为线路接收端电压。

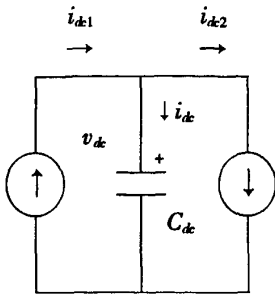
根据瞬时复功率的定义, 可得 UPFC 串联侧向线路注入的有功  $P_2$ 、无功功率  $q_2$  分别如式 (8),(9)所示:

$$P_2 = \frac{3}{2} (v_{cd}i_d + v_{cq}i_q) \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{3}{2} (v_{cq}i_d - v_{cd}i_q) \quad (9)$$

### 2.3 直流侧数学建模

UPFC 直流侧的等值电路如图 4 所示。



4 UPFC 直流侧的等值电路

根据图 4 以及式(5)、式(8)可得 UPFC 直流侧数学模型(用瞬时值表示),如式(10)所示:

$$\frac{du_{dc}}{dt} \frac{3}{2C_{dc}v_{dc}}(v_{sd}i_{cd} + v_{sq}i_{cq} - v_{cd}i_{d} - v_{cq}i_{q}) \quad (10)$$

### 3 结束语

针对 UPFC 运行状态进行分析的基础上,基于

UPFC 并联侧、串联侧和直流侧的等值电路,建立了基于  $dg$  旋转坐标系下 UPFC 并联侧、串联侧和直流侧的数学模型,该数学模型较具普遍性,为后续更合理的设计 UPFC 控制器做好铺垫。

#### 参考文献:

- [1]Kalayan Sen K, Eric Stacey J. UPFC—Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling, and Applications [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1998,13(4):1453-1460.
- [2]Papic I, Zunko P, Povh D, Weinhold M. Basic Control of Unified Power Flow Controller [J]. IEEE Trans. Power System, 1997,12(4):1734-1739.
- [3]Peng F Z, Lai J S. Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inverters [J].IEEE Transactions on Industry Applications, 1997,33 (3):748-755.

责任编辑:胡德明

## The Operating State Analysis and Mathematical Modeling of Unified Power Flow Controller

Hou Li, Liu Qi

(School of Information Engineering, Huangshan University, Huangshan 245021, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the operating state and single equivalent circuit of unified power flow controller, a mathematical model of unified power flow controller is established based on  $dg$  rotating coordinate. Being universal, the mathematical model can facilitate the analysis and control of unified power flow controller conveniently.

**Key words:** unified power flow controller; single equivalent circuit;  $dg$  coordinate; mathematical model

# UPFC的运行状态分析与数学建模

作者: [侯丽](#), [刘琦](#), [Hou Li](#), [Liu Qi](#)  
作者单位: [黄山学院, 信息工程学院, 安徽, 黄山, 245021](#)  
刊名: [黄山学院学报](#)  
英文刊名: [JOURNAL OF HUANGSHAN UNIVERSITY](#)  
年, 卷(期): 2010, 12(5)  
被引用次数: 0次

## 参考文献(3条)

1. [Kalayan Sen K, Eric Stacey J](#) [UPFC-Unified Power Flow Controller:Theory, Modeling, and Applications](#) 1998(4)
2. [Papic I, Zunko P, Povh D, Weinhold M](#) [Basic Control of Unified Power Flow Controller](#) 1997(4)
3. [Peng F Z, Lai J S](#) [Dynamic performance and control of a static var generator using cascade multilevel inserters](#) 1997(3)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hsyxb201005007.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hsyxb201005007.aspx)

授权使用: 黄山学院学报(qkhsxy), 授权号: 4c02674d-0d65-4308-bb04-9ebd00b7431a

下载时间: 2011年4月6日