

DOI:10.19651/j.cnki.cmt.2107337

UPFC 并联变换器协调控制策略研究*

张海同 王金梅 袁小威 何铭 鲍振铎

(宁夏大学物理与电子电气工程学院 银川 750021)

摘要: 针对统一潮流控制器(UPFC)在调节电力线路潮流过程中存在的功率不平衡引起的 UPFC 接入点电压和直流电容电压波动问题,通过构建 UPFC 的数学模型,设计并联变换器电流解耦控制器,根据功率平衡原理推导出稳压控制的电流前馈补偿量,提出改进的并联变换器协调控制策略,将得到的前馈补偿量引入到并联变换器有功和无功控制系统中,为实现单位前馈采用移动前馈补偿点和增加前馈补偿函数方法,来改善补偿效果。通过 MATLAB 搭建含有 UPFC 的 500 kV 交流输电系统仿真模型,结果表明,相比改进前的协调控制策略,所提控制策略既满足了有功无功潮流相互协调控制要求,又提高了输电系统对电压的支撑能力(接入点电压和直流电容电压波动已分别降低至 6.7 kV、1.1 kV),系统对直流电容的输出响应时间也缩短了 0.5 s。

关键词: 统一潮流控制器;潮流调节;解耦控制;电压波动;协调控制;前馈补偿量

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on coordinated control strategy for shunt converter of UPFC

Zhang Haitong Wang Jinmei Yuan Xiaowei He Ming Bao Zhenduo

(School of Physics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In line power flow regulation, in order to solve the problem that UPFC bus point voltage and DC capacitor voltage fluctuation, by setting up UPFC mathematical model, current decoupling controller of parallel converter are designed, according to the principle of power balance, the current feedforward compensation of voltage stabilization control is derived, and an improved coordinated control strategy based on shunt converter is proposed. The obtained feedforward compensation amount is introduced into the active and reactive power control system of the parallel converter, in order to realize unit feedforward, the methods of moving feedforward compensation points and adding feedforward compensation functions are adopted to improve the compensation effect during power flow regulation. MATLAB is used to build a simulation model of 500 kV AC transmission system with UPFC, the results show that compared with the coordinated control strategy before improvement, the proposed control strategy not only meets the requirements of coordinated control of active and reactive power flows, but also improves the voltage supporting capacity of the transmission system (the fluctuation of access point voltage and DC capacitor voltage has been reduced to 6.7 kV and 1.1 kV respectively), the response time of the system to the output of DC capacitor is also shortened by 0.5 s.

Keywords: unified power flow controller; current regulation; decoupling control; voltage fluctuation; coordination control; feedforward compensation amount

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为第3代柔性交流输电 FACTS 装置的代表,是迄今为止功能最为全面的 FACTS 装置^[1];作为串、并联结

合的控制器,能有效地进行线路的潮流控制、无功功率补偿及电压的动态调节,在提高电能质量和改善输电系统稳定运行方面等方面发挥着非常重要的作用^[2-6]。

在电力系统潮流控制时,需保持 UPFC 接入点电压和 UPFC 内部直流电容电压恒定,否则会导致电压偏移较大

收稿日期:2021-07-25

* 基金项目:宁夏自然科学基金(2019AAC03027)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BDE03003)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BFH03004)资助

或者 UPFC 停机从而影响电力系统^[7],因此有必要优化接入点电压和直流侧电压。文献[8-10]是传统的 UPFC 协调控制,从调节线路潮流的角度出发,将线路有功无功潮流作为系统输入量,来提高控制效果,由于控制器延迟,使得其动态特性略差;文献[11]提出一种分段反馈控制方法,抑制变换器在脉冲输入电压作用下发生的混沌和分叉现象,对于提高变换器稳定运行性能效果显著;文献[12]提出在 UPFC 并联部分采用双环控制,在传统的 PI 控制基础上引入电流前馈环节和电流反馈环节的控制策略,并使用标幺值计算控制参数,通过仿真实验验证策略的合理性;文献[13]提出了一种新的切换控制方法用于变换器,可降低系统频率维持输出电压恒定,该方法在一定程度上提高了输电系统稳定性并且减少了系统损耗;文献[14]详细分析了 UPFC 串并联侧变换器有功、无功的交互影响,和交互影响程度与控制器间的耦合程度的关系,并未涉及改进方法;文献[15]提出了以 UPFC 接入点电压变动值作为计量 UPFC 控制器间交互影响强弱的指标并且用 Logistic 模型预测交互影响程度的方法,来分析 UPFC 有功潮流控制对并联侧变换器运行带来的影响,但忽略了 UPFC 接入点电压的过电压对有功潮流的影响,而且该方法应用较少;文献[16]设计了一种三端口直流变换器,可实现任意两端口功率交换,通过二次升压来稳定系统电压输出,在新能源系统中可保证高增益电压输出;文献[17]提出一种新型的解耦控制方法,通过利用串联侧的有功功率和相位、无功功率和电压两两组合的控制方法,来达到系统功率平衡的目的,由于该文献所采用方法为非线性控制,使得控制器参数整定略有不足,参数的获取需通过反复试错,缺乏理论方法。

综上所述,针对 UPFC 系统在潮流调节时的接入点电压和直流电容电压波动的问题,提出基于改进的并联变换器协调控制策略,设计解耦控制器,将得到的前馈补偿量引入到并联变换器有功和无功控制系统中,为实现单位前馈采用移动前馈补偿点和增加前馈补偿函数的方法,来改善补偿效果,降低潮流控制过程中的电压波动,减少系统响应时间,提高系统协调控制效果,以期在潮流控制过程中改善电力系统对电压的支撑能力提供理论基础。

1 UPFC 数学模型

UPFC 主要由变压器以及两个电压源型变换器通过直流电容背靠背联接而成,由于变换器接入线路方式不同分为并联变换器和串联变换器。图 1 是 UPFC 结构图,图中, V_S 和 V_R 分别为线路首端、末端电压矢量, V_1 和 V_2 为 UPFC 接入两端线路电压矢量, V_{12} 为串联侧注入补偿电压矢量, V_{dc} 为直流侧电容电压, I_S 和 I_1 分别为线路首端输入电流、线路电流矢量, I_{sh} 为并联侧变换器输入电流矢量, $P_s + jQ_s$ 为线路首段输送功率, $P_{line} + jQ_{line}$ 为线路末端输送功率, $P_{sh} + jQ_{sh}$ 为并联侧与线路交换功率, $P_{se} + jQ_{se}$ 为

串联侧交换功率。

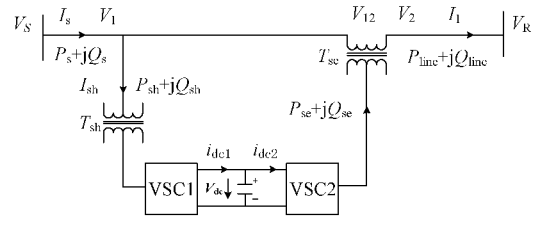


图 1 UPFC 结构图

UPFC 串、并联变换器数学模型可表示如下^[27]:

$$L_{sh} \frac{d}{dt} i_{shj} = v_{1j} - v_{shj} - R_{sh} i_{shj} \quad (j = a, b, c) \quad (1)$$

$$L_{sc} \frac{d}{dt} i_{scj} = -v_{12j} + v_{scj} - R_{sc} i_{scj} \quad (j = a, b, c) \quad (2)$$

式(1)中 L_{sh} 、 i_{sh} 、 v_{sh} 和 R_{sh} 分别表示并联侧线路电感、并联变换器输出电流、并联变换器输出电压和并联变换器等效内阻。

式(2)中 L_{sc} 、 i_{sc} 、 v_{sc} 和 R_{sc} 分别表示串联侧线路电感、串联变换器输出电流、串联变换器输出电压和串联变换器等效内阻。

将三相电压作 dq 变换,其变换矩阵如下:

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos\omega t & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(1)、(2)变换,可得 dq 变换下数学模型:

$$L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1d} - v_{shd} \\ v_{1q} - v_{shq} \end{bmatrix} - R_{sh} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \omega L_{sh} \begin{bmatrix} -i_{shq} \\ i_{shd} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$L_{sc} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{scd} \\ i_{scq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{scd} - v_{12d} \\ v_{scq} - v_{12q} \end{bmatrix} - R_{sc} \begin{bmatrix} i_{scd} \\ i_{scq} \end{bmatrix} + \omega L_{sc} \begin{bmatrix} -i_{scq} \\ i_{scd} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{并有} \begin{bmatrix} v_{1d} \\ v_{1q} \end{bmatrix} = \sqrt{3} V_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

由式(4)、(5)可知,并联变换器和串联变换器的有功无功电流分量 i_d 和 i_q 都有着强烈的耦合现象。因此,需要对其解耦,设计解耦控制系统。

2 并联变换器协调控制策略

2.1 并联变换器电流内环解耦控制

将上述并联变换器数学模型变换,即:

$$L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = -R_{sh} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1d} - v_{shd} - \omega L_{sh} i_{shq} \\ v_{1q} - v_{shq} + \omega L_{sh} i_{shd} \end{bmatrix} \quad (6)$$

令:

$$\begin{cases} X_1 = v_{1d} - v_{shd} - \omega L_{sh} i_{shq} \\ X_2 = v_{1q} - v_{shq} + \omega L_{sh} i_{shd} \end{cases} \quad (7)$$

解耦后可得:

$$L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = -R_{sh} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在这里,将 X_1 和 X_2 作为辅助控制系统的变量,采用 PI 控制,设计出 X_1 和 X_2 的控制策略为:

$$\begin{cases} X_1 = \left(K_p + \frac{K_1}{s} \right) (i_{shd}^* - i_{shd}) \\ X_2 = \left(K_p + \frac{K_1}{s} \right) (i_{shq}^* - i_{shq}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_p 和 K_1 分别为 PI 控制器比例系数、积分系数, i_{shd}^* 和 i_{shd} 分别为并联变换器输出电流 d 轴的设定值与实际值, i_{shq}^* 和 i_{shq} 分别为并联变换器输出电流 q 轴的设定值与实际值。

由式(9)可知,通过调节 X_1 和 X_2 来达到对耦合量 i_{shd} 和 i_{shq} 的线性化解耦控制,从而实现对有功电流和无功电流的控制。

并联变换器电流内环控制系统如图 2 所示。

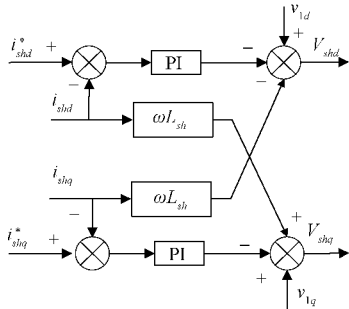


图 2 并联变换器电流内环控制系统

2.2 并联变换器稳压控制

在输电系统潮流控制过程中,并联变换器为 UPFC 内部平衡提供了必要的条件;一是对传输线路进行无功补偿从而稳定 UPFC 接入点电压,二是维持直流侧电容电压恒定,为串、并联变换器提供良好的通路进行有功功率的交流。稳定的电压为变换器正常工作提供了基础保障,所以有必要对 UPFC 接入点电压和其内部电容电压进行较好的控制,才能使得并联变换器有更好的动态特性。

根据功率平衡原理:

$$P_{sh} = P_{shR} + P_{dc} \quad (10)$$

$$P_{dc} = P_{sc} + P_{scR} \quad (11)$$

式(10)中 P_{sh} 、 P_{shR} 和 P_{dc} 分别是并联变换器有功功率、内耗功率、直流侧交换功率。

式(11)中 P_{sc} 和 P_{scR} 分别是串联变换器有功功率、内耗功率。

假定电网电压三相对称,可得:

$$i_{scn}^2 + i_{scb}^2 + i_{scc}^2 = \frac{3}{2} I_{sc}^2 \quad (12)$$

通过式(12)可得串联变换器瞬时有功:

$$P_{sc} = v_{12a} i_{scn} + v_{12b} i_{scb} + v_{12c} i_{scc} = \frac{3}{2} V_{12} I_{sc} \cos\varphi \quad (13)$$

式(13)中 φ 为电压 V_{12} 与电流 I_{sc} 的相位差。

已知:

$$P_{dc} = V_{dc} i_{dc2} \quad (14)$$

$$P_{scR} = \frac{3}{2} R I_{sc}^2 \quad (15)$$

将式(13)~(15)代入式(11)中,可得:

$$i_{dc2} = \frac{3}{2V_{dc}} (V_{12} I_{sc} \cos\varphi + R I_{sc}^2) \quad (16)$$

由于 P_{scR} 远远小于 P_{sc} , 因此可以忽略 P_{scR} 值的影响,式(16)可简化为:

$$i_{dc2} = \frac{3 I_{sc} V_{12} \cos\varphi}{2V_{dc}} \quad (17)$$

式(17)可变化为:

$$I_{sc} = \frac{2V_{dc} i_{dc2}}{3v_{12} \cos\varphi} \quad (18)$$

将式(18)进行坐标变换,可得稳压控制系统有功电流前馈补偿量:

$$i = \frac{2V_{dc} i_{dc2}}{3v_{12d}} \quad (19)$$

同理可得,无功电流前馈补偿量:

$$i = \frac{Q_{line}^*}{v_{1q}} \quad (20)$$

上述可知,在并联变换器稳压控制系中引入有功电流前馈补偿量和无功电流前馈补偿量,通过调节控制有功无功前馈补偿量,来改善功率协调控制效果,提高系统对电压的支撑能力,降低系统响应时间。

2.3 并联变换器协调控制

通过上文分析,得出 UPFC 并联变换器双环控制系统,如图 3 所示。在系统中由于电感和 PI 控制器的影响,即电流环控制器带宽对前馈补偿点的影响,使得电流实时补偿能力较差,导致控制效果降低。为提高系统协调控制特性,将有功功率无功功率协调控制做出改进,具体思路是将电流内环的前馈补偿点进行移动并且,同时为进一步改善补偿效果在前馈通道中增加前馈补偿函数,实现单位前馈。

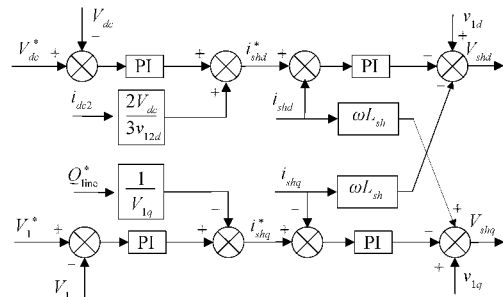


图 3 UPFC 并联变换器双环控制系统

有功功率协调控制如图 4 所示,为绕过电流内环控制器,避免内环控制器带宽对前馈的影响,将前馈补偿点从电流内环输入节点(a)右移至输出节点(b)。

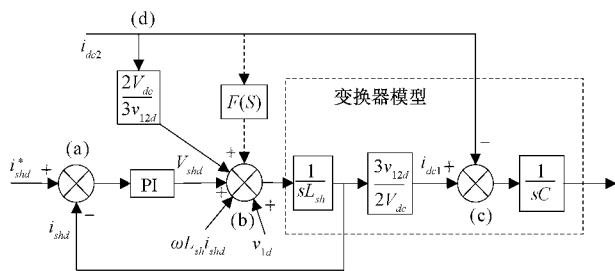


图 4 有功功率协调控制系统

由图 4 可知,若是前馈补偿点在电流内环输入节点(a)处,则从节点(d)到(c)传递函数为:

$$G(s) = \frac{(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s}) \frac{1}{sL_{sh}}}{1 + \frac{1}{sL_{sh}}(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})} \quad (21)$$

式中: k_{ip} 、 k_{ii} 分别为 UPFC 并联变换器电感电流、积分比例系数

由式(21)可知,当 L_{sh} 无限小、增益无限大时,从节点(d)到节(c)的传递函数才会为单位前馈。实际上,考虑到电流滤波的要求, L_{sh} 也不可能无限小;同时又要保证 PI 控制器的稳定,控制器增益也不可能取到无限大。由于以上因素,使得 i_{dc2} 无法准确及时地跟踪 i_{dc1} , 致使电容电压波动范围大。所以,将 UPFC 并联侧变换器有功功率协调控制系统做出改进。

将串联变换器直流测电流 i_{dc2} 作为扰动量,假定前馈补偿函数为 $F(S)$, 那么从节点(d)到(c)的传递函数为:

$$G(s) = F(S) \frac{1}{sL_{sh}} \frac{3V_{12d}}{2V_{dc}} \quad (22)$$

为实现单位反馈,即 $G(s) = 1$, 则可求得 $F(S)$ 为:

$$F(S) = sL_{sh} \frac{2V_{dc}}{3V_{12d}} \quad (23)$$

加快直流电容电压控制速度,将式(23)作为前馈补偿量叠加在并联变换器内环 d 轴电流控制器的输出端,当直流电容电压剧烈波动时,直流电容电压始终存在闭环控制,通过控制有功电流分量,来抑制直流电容越限。

无功功率协调控制如图 5 所示。

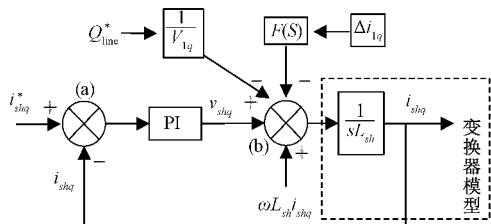


图 5 无功功率协调控制系统

同理可知,无功功率协调控制系统从前馈补偿点(a)到电压外环输出节点(b)的传递函数也并非为单位前馈。因此将无功功率协调控制系统做出改进,而且作为稳态变量的 Q_{line}^* , 无法动态的跟踪线路无功变化,所以使用线路电流

I_1 的 q 轴分量的变化量 Δi_{1q} 来代替 Q_{line}^* 作为前馈补偿量输入,更加及时准确的跟踪线路无功的变化,提高协调控制效果。同理可求的前馈通道增加的补偿函数为:

$$F(S) = sL_{sh} \quad (24)$$

为提高输电系统对并联侧接入点电压支撑能力,将式(24)作为前馈补偿量叠加在并联变换器内环 q 轴电流控制器的输出端,改善补偿效果。

3 仿真研究

通过利用 MATLAB 搭建含有 UPFC 的 500 kV 交流输电系统仿真模型,验证协调控制策略有效性。UPFC 系统控制的线路有功功率和无功率初始值分别为 5.32 p. u.、-0.3 p. u., 仿真时间为 10 s, 在第 1 s 时 UPFC 启动切入。系统主要仿真控制参数如表 1 所示。

表 1 UPFC 主要仿真参数

仿真参数	数值
直流电容电压 V_{dc} /kV	40
直流电容 C_{dc} /mF	0.76
传输线路电感 L_R /mH	1.7
线路首端电感 L_s /mH	0.13
并联变换器输入电感 L_{sh} /p. u	0.24
串联变换器输出电感 L_{sv} /p. u	0.24

图 6 为有功功率仿真波形图,由图 6 可知,线路有功功率初始值为 5.32 p. u., 在前 1 s 内由于 UPFC 未启动,潮流调节能力不佳,使得输出响应有轻微波动,UPFC 启动投入后,系统快速动作,使得有功功率实际值紧跟设定值;在第 5 s 时将有功功率设置为 6.82 p. u., 0.86 s 后有功功率实际值快速跟踪设定值与其保持同步,并且几乎重合;设定值改变前后,有功功率调节有着较好的调节效果和响应速度。

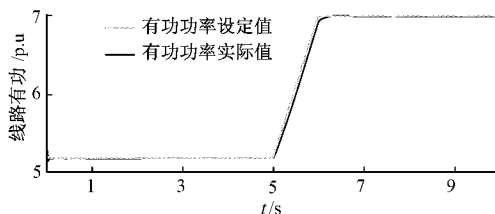


图 6 有功功率波形图

图 7 为无功功率仿真波形图,由图 7 可知,线路无功功率初始值为 -0.3 p. u., 在 0~1 s 时,无功功率起伏波动剧烈,系统调控效果较差;在 1 s 时 UPFC 切入,由于在协调控制方法的增幅下,无功功率实际值迅速下降至与设定值幅值相同;在第 5 s 时无功功率设定值变为 -0.15 p. u., 由于并联变换器本身功能特点和协调控制策略,进一步加快了无功响应速度,经过 0.14 s 后无功功率实际值便快速准确的跟踪到设定值;综上可知,在并联变换器协调控制策略

下,含有 UPFC 的 500 kV 交流输电系统有着良好的潮流调控能力,也能满足有功功率和无功功率相互协调控制要求。

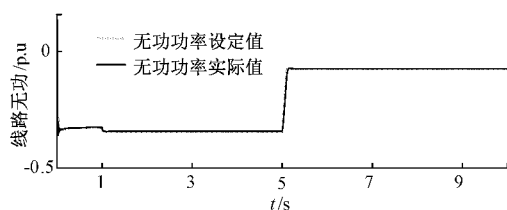


图 7 无功功率流波形图

为进一步验证协调控制效果,改变输电系统潮流分布(有功功率和无功功率初始设定值不变,在 1 s 时投入 UPFC,3 s 时有功功率设定值变为 6.82 p.u.,在 7 s 时又恢复至初始设定值),观察 UPFC 接入点电压和直流电容电压波形。

UPFC 并联侧接入点电压仿真波形如图 8 所示。

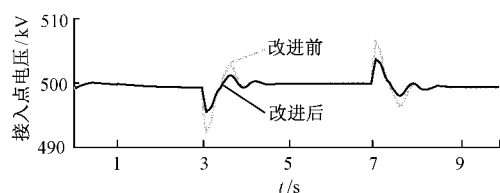


图 8 UPFC 并联侧接入点电压波形图

由图 8 和可知,在采用协调控制方式后,并联侧接入点电压的最大值和最小值分别由 506.4 kV、492.7 kV 变为 502.8 kV、496.1 kV,电压波动幅值由 13.7 kV 减小至 6.7 kV,并联侧接入点电压幅值波动范围明显变小。

UPFC 直流电容电压仿真波形如图 9 所示。

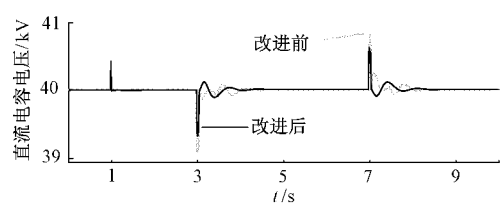


图 9 UPFC 直流电容电压波形图

由图 9 可知,在 1 s 时 UPFC 投入,由于电容特性,电容电压出现毛刺;改进前电容电压不仅振荡严重而且波动范围大,在经过 1.5 s 后电容电压趋于稳定。改进后电容电压最大值和最小值分别由 40.9 kV、39.1 kV 变为 40.7 kV、39.6 kV,电压波动由 1.8 kV 减少为 1.1 kV;在经过 1 s 时电容电压已经趋于稳定,电容电压振荡次数明显减少,振荡波形更加平滑,电压波动幅值很大程度上减少了,电容电压波形衰减时间明显减少,系统对直流电容的输出响应时间也缩短了 0.5 s。

4 结 论

文中针对潮流控制过程中 UPFC 系统的接入点电压

和直流电容电压波动的问题,提出基于改进的并联变换器协调控制策略,设计解耦控制器,将得到的前馈补偿量引入到并联变换器有功和无功控制系统中,为实现单位前馈,在前馈通道中增加前馈补偿函数,改善补偿效果,来降低潮流控制过程中的电压波动,减少系统响应时间。

理论分析与仿真结果显示:在文中控制策略下,UPFC 系统协调控制效果良好,在一定程度上,提高了输电系统对电压的支撑能力了。

未来还可以进一步研究文中方法对并联变换器暂态稳定性影响。

参考文献

- [1] 刘国静,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 78-86.
- [2] 康润生,张锐. 模块化多电平逆变器的仿真分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 23-28.
- [3] YANG J, XU Z, ZHANG Z. Analysis of unified power flow controller steady-state power flow regulation capability and its key factors[J]. Energies, 2020, 13(17): 4419-4419.
- [4] 阳同光,桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器多目标协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 148-157.
- [5] LIU H, LI X, QIN G, et al. Stability of grid connected system of two types of wind turbines with UPFC[J]. The Journal of Engineering, 2018, 2017(13): 2178-2183.
- [6] 林金娇,李鹏,高磊,等. 基于提升故障穿越能力的 UPFC 重启策略研究及应用[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 163-169.
- [7] 朱龙臻,易映萍. MMC 子模块优化均压策略的研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 49-53.
- [8] 赵峰,赵雨欣,阎宏. 统一潮流控制器功率解耦控制策略的研究[J]. 电测与仪表, 2014(7): 39-44.
- [9] AYALAKSHMI V. Real and reactive power coordination for a unified power flow controller[J]. Middle east Journal of Scientific Research, 2014, 20(11): 1680-1685.
- [10] 唐爱红,卢俊,周新民,等. 基于 UPFC 的风力发电功率控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 129-132, 156.
- [11] 张瑞瑞,张小平. BBMC 逆变级分段延迟反馈控制参数稳定域[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 130-136.
- [12] 刘永江,康积涛,李林,等. UPFC 并联侧双环控制策略的研究[J]. 浙江电力, 2011, 30(7): 1-5.
- [13] 卢自宝,龚莉,赵传超,等. 直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021,

- 41(8): 202-209.
- [14] 刘青, 马朋, 邹家平. UPFC 无功潮流控制引起负交互影响的解决方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 76-81.
- [15] 马朋, 刘青, 邹家平. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 176-181, 223.
- [16] 魏业文, 裴俊波, 姜恒, 等. 一种非隔离的高增益三端口直流变换器[J]. 电子测量技术, 2021, 44(14): 43-50.
- [17] 赵树野, 党伟, 钟诚, 等. UPFC 串联侧变流器幅相解耦控制策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(7): 29-37.

作者简介

张海同, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

E-mail: 1255089653@qq.com

王金梅(通信作者), 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网。

E-mail: wang_jm@nxu.edu.cn