

文章编号:1007-5321(2020)02-0122-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2019-108

# 基于无线通信组网的 DPFC 系统控制策略

陈 泓<sup>1,2</sup>, 封 科<sup>1,2</sup>, 钟亮民<sup>1,2</sup>, 赵静波<sup>3</sup>, 朱开阳<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106;  
3. 江苏省电力公司科学研究院, 南京 210008)

**摘要:**为了解决分布式潮流控制(DPFC)系统因单元数量众多、分布距离远导致控制难的问题,提出了一种基于无线通信组网的 DPFC 系统控制策略。针对 DPFC 装置分布式安装的特点和快速控制的要求,从系统层面提出一种基于无线通信组网方式的控制系统架构。该方案通过主从控制方式,由主控制器同时对多个子单元进行协调控制。对集中控制的控制策略进行了研究,并通过仿真算例验证了策略的有效性。

**关键词:**分布式潮流控制器;无线通信;主从控制;控制策略

中图分类号:TN911.22

文献标志码:A

## Control Strategy of DPFC System Based on Wireless Communication Network

CHEN Xiong<sup>1,2</sup>, FENG Ke<sup>1,2</sup>, ZHONG Liang-min<sup>1,2</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>3</sup>, ZHU Kai-yang<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China;

3. Electric Power Research Institute of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** A control strategy of distributed power flow controllers (DPFC) system based on wireless communication network was presented to solve the problem of difficult DPFC control because of the large number of units and the long distribution distance. Considering the characteristics of distributed installation and the requirements of rapid control, of DPFC devices, a control system architecture based on wireless communication networking at the system level is proposed. The scheme adopts the master-slave control method, and the main controller performs coordinated control on multiple sub-units simultaneously. The control strategy of this centralized control mode is studied in detail, and the effectiveness of the strategy is verified by a simulation example.

**Key words:** distributed power flow controller; wireless communication; master-slave control; control strateg

潮流控制技术作为现代电力系统中的前沿技术,是增强输配电系统可控性和灵活性,提高运行稳定性和经济性的重要手段。柔性交流输电系统

(FACTS, flexible alternating current transmission systems)是建立在电力电子或其他静止型控制器基础上的,能提高可控性和增大电力传输能力的交流

收稿日期:2019-06-13

基金项目:国家电网有限公司科技项目(8516000700)

作者简介:陈 泓(1978—),男,高级工程师。

通信作者:封 科(1992—),男,工程师, E-mail: fengkel@sgpri.sgcc.com.cn.

输电系统,能够对交流输电系统的阻抗、电压、相位、功率等实施精确、快速、连续、频繁和大范围地调节。

目前针对集中式 FACTS 进行了许多研究,集中在对 FACTS 安全性和可靠性的深入研究,以及在潮流控制中对保护动作的影响的研究<sup>[1-3]</sup>。现有的集中式 FACTS 在实际应用中表现出维护量大、操作复杂等问题。针对这些问题,将目前采用的大型集中式 FACTS 装置小型化、使其结构更简单、同时应用更方便,分布式柔性交流输电系统(D-FACTS, distributed flexible alternating current transmission systems)技术即为实现这一目标的理想选择<sup>[4]</sup>。

目前 D-FACTS 的研究继承了集中式 FACTS 的技术路线,大部分研究还处在理论研究和仿真验证阶段,主要集中在子模块控制逻辑设计、布点方案等方面的研究。唐爱红等<sup>[5]</sup>对基于统一潮流控制器(UPFC, unified power flow controller)的分布式潮流控制器的系统功率控制的特性进行了研究,通过其串并联等效数学模型得分析得出了分布式潮流控制器的控制系统模型;冯雅等<sup>[6]</sup>研究了分布式潮流控制器(DPFC, distributed power flow controllers)的串联并联侧变换器的控制特性,并在所有的线路中均装设有子控制单元的前提下,利用蚁群算法研究了不同扰动下的 DPFC 最优投切方案;袁玮等<sup>[7]</sup>建立了系统级和变流器级的 DPFC 数学模型,并研究了其在不同潮流控制模式和不同故障情况下的控制特性;李顺等<sup>[8]</sup>研究了 DPFC 改善最大输电能力期望和供电可靠性效能的方法,分析了不同安装位置、装设容量和装置数量对 DPFC 提升电网性能的影响;汤奕等<sup>[9]</sup>提出了基于系统最大承载能力和投资费用指标的两阶段优化方案,研究了 DPFC 安装位置及容量的最优配置方案;徐雨田等<sup>[10]</sup>从全寿命周期收益率角度对 DPFC 模型进行优化配置,通过改进粒子群算法得到了 DPFC 安装配置和潮流提升性能。

首先在系统层面,阐述了基于分布式安装的 DPFC 控制单元的总系统架构;然后,对系统的无线通信组网方式进行比较并提出切实可行方案。在此基础上,说明了主从控制模式下主控制器和子单元的基本结构和功能。从集中控制的角度研究了该 DPFC 系统基于无线通信的子控制单元投切协调控制策略,并通过仿真验证了在无线通信策略的有效性。

# 1 基于无线通信组网的 DPFC 系统架构

## 1.1 总体架构

如图 1 所示,DPFC 系统由子单元和主控制器组成,二者以无线方式进行通信。子单元架设在架空线上,内部的电压源换流器(VSC, voltage source converter)单元通过耦合变压器串联于输电线路,可连续或分级快速调节线路阻抗。

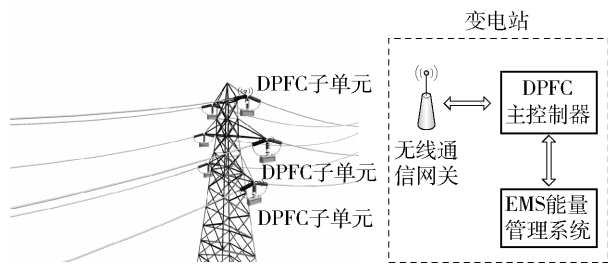


图 1 系统架构

## 1.2 系统通信组网方式

通信网连接着 DPFC 的主控制器和子单元,其性能与可靠性的优劣,影响着整个系统功能的实现及其可靠运行。DPFC 系统的通信站点众多,站点分散,通信距离远,户外环境差,选择一种满足系统要求的通信方式非常重要。

电力系统二次设备远距离通信广泛采用光纤网络,从通信的可靠性及可行性角度分析,光网络的数据传输可靠性最高、数据带宽也最大,但投资也相对最大,从经济性的角度不是首选。基于无线通信方式的网路较为灵活,安装方便,投资也较小,对于本项目有很强的适应性<sup>[11-14]</sup>。通用分组无线服务技术(GPRS, general packet radio service)和远距离无线电(LORA, long range radio)通信方式能满足项目对通信的要求,并且方便实施,易于维护,本项目选择基于 GPRS 和 LORA 相互备用的通信方式作为 DPFC 系统主机和子机之间的通信方式。

变电站主控制器和每个 DPFC 子单元都设计成通讯终端,有自己的地址编码。变电站主控制器优先与 LORA 无线基站建立联系,发出投入或退出、调节控制等指令,利用通信网络传递信息至无线基站,再呼叫指定的 DPFC 子单元。DPFC 子单元的无线通信组件收到信息后,解析出指令给控制电路,进行相应的动作。在 LORA 连接无法工作时切换至 GPRS 网路,利用公网进行数据交换。LORA 无线通信网络以串联级联方式进行组网,如图 2 所示。主

控制器发出的数据首先传送到最近的耐张塔上的子单元,远将信号传送至最后的子单元.单元,再由该子单元将信号传向下一级,逐级由近及

表 1 通信方式分析对照表

通信方式	通信速率/MB	传输距离/km	实时性	建设成本	可维护性
光纤通信网络	速率最快 100	传输距离不受限	高	成本高	维护难度大
GPRS 公网	0.010	传输距离不受限	差	低成本	易于维护
Zigbee	0.250	1	一般	低成本	易于维护
LORA	0.050	距离远 15	较好	低成本	易于维护

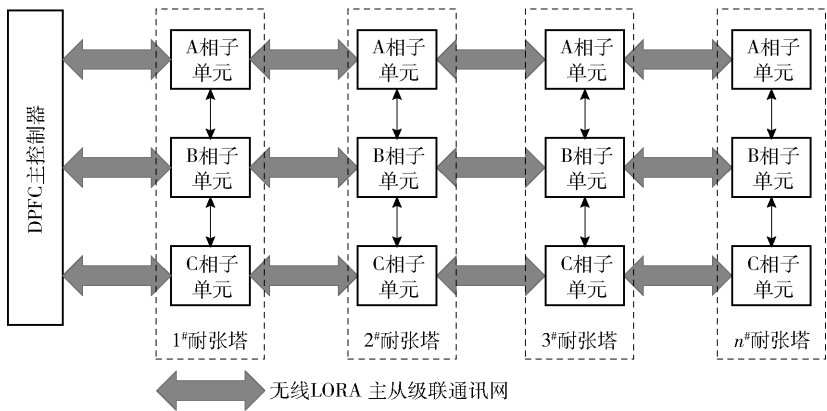


图 2 通信方式示意图

针对级联组网方式,在工程应用中建议采用“由近及远”投切控制原则,以尽可能降低无线通信的传输延时.如图 2 所示,具体操作中,依据主控器的下发指令,计算得到本轮次的投切子单元个数.根据子单元与主控器的距离远近,先满容量投入 1# A 相子单元,然后投 2#A 相子单元,直至远方最后一个本轮待投子单元.当退出地单元时,则类似地,先切除最远端的子单元,以此类推.

实际的应用中,DPFC 子单元可能会长时间无操作.变电站控制器要定时向 DPFC 子单元发巡检命令. DPFC 子单元收到巡检命令后,要向变电站控制返回应答指令,上报该子单元的工作状态.若 DPFC 子单元在运行期间发生故障,其也能主动地向变电站主控制器发回故障信息.在通信协议层,目前电力系统通信使用的规约主要有 IEC 60870-5-101/103/104、DNP3.0、ModBus、IEC61850 等<sup>[15-16]</sup>.对于 DPFC 控制系统,考虑到系统的可靠性及实时性要求采用效率相对较高的协议 ModBus,由于系统数据有可能经过公网传送,应用层数据需经过加密传送.

1.3 主控制器单元

DPFC 主控制器能够发送控制指令给子单元,实现对子单元各部件的控制,子单元将自身保护、状

态监测及自检信息上报给主控制器. DPFC 系统主控制器采用多 CPU 并行处理各功能,实现系统实时控制,图 3 所示为主控制器单元模块.

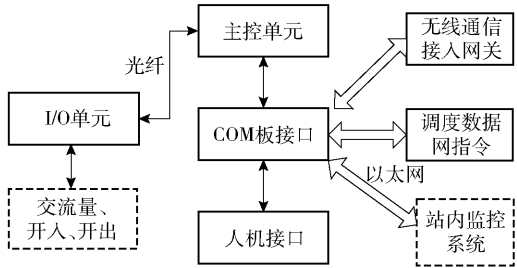


图 3 DPFC 主控单元功能模块

1) COM 模块是主控制器对外通信接口模块,本模块负责对接无线通信(GPRS 和 LORA)接入网关、调度数据网以及站内的监控系统,COM 模块在装置内处理来自主控单元的运行数据,也可以处理来自人机接口模块的数据请求.

2) 人机界面模块提供了友好的人机界面,方便了装置的运行维护,本模块从 COM 模块获取数据.

3) 主控单元是高速 DPFC 控制策略计算处理模块,本模块是整个主控制器的核心组件,运行控制策略,发出控制命令,主控单元接收 I/O 单元的电气量信息,并把控制命令发送给 COM 模块.

4) I/O 单元是电气量数据采集计算处理模块,负责采集电气量信息,对线路运行状态进行判断,计算结果上送主控单元。

5) 交流量、开入开出模块,布置装置的二次 PT、CT,采集压板信号,采集保护跳闸信号。

主控制器装置整体架构负责控制策略实时计算处理,根据实时工况及调度指令,对整个系统采取相应的控制措施,对控制过程进行控制事件记录;COM 模块是对外通信数据处理中心,主控制器对下支持 LORA、GPRS 通信接口,采用自定义规约,支持数据加密,发送控制指令对线路潮流进行闭环控制,支持主控制器支持以太网接口对接调度系统,支持 104 规约,接受调度系统调节指令。

1.4 子控制单元

DPFC 子单元可以串联安装在架空输电线上,其内部的电压源换流器(VSC)单元通过耦合变压器串联于输电线路,可连续或分级快速调节线路阻抗。线路上安装的 DPFC 数量越多,对线路的潮流控制越灵活。

图 4 为 DPFC 子单元的拓扑图,子单元系统由单匝变压器 PT1、避雷器 MOV、旁路 BPS、滤波电路、VSC 及其阀控系统等组成。DPFC 系统主要有旁路

模式、串联电抗器模式和无功注入模式 3 种工作模式。

在旁路模式下,旁路 BPS 闭合,电压源换流器 VSC 不工作,耦合变压器副边被短路。在串联电抗器模式下,旁路 BPS 断开,电压源换流器 VSC 不工作,耦合变压器副边开路。多个 DPFC 单元串联电抗器模式时,等效于在系统中串入多组电抗,可实现系统有级阻抗调节。在无功注入模式下,功能选通开关选通 VSC 模块,DPFC 子单元副边的电压源换流器输出容性、感性无功。

2 DPFC 系统控制策略

DPFC 的系统级控制决定了 DPFC 的补偿模式和控制特性,是 DPFC 潮流控制的中心。DPFC 的系统级控制由 DPFC 主控器实现:电网稳态运行时,主控器根据运行人员设定的系统潮流调节目标及设定的补偿模式确定线路上 DPFC 子单元运行状态、输出容量,并通过无线通讯给线路上的各 DPFC 子单元发送调节指令,从而实现调节系统潮流。在电网发生故障时,能及时识别故障,闭锁装置,防止子单元损坏。

主控器主要有恒功率运行控制、恒阻抗运行控

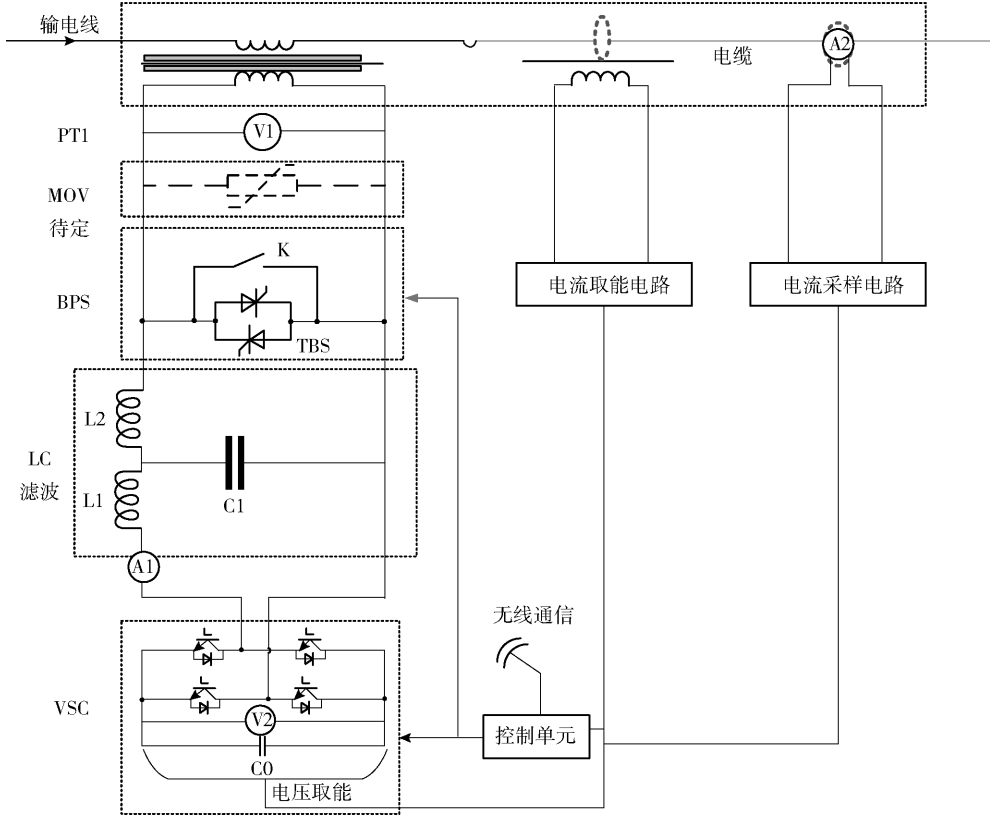


图 4 DPFC 子单元拓扑图



制、恒电压运行控制 3 种潮流控制模式. 而实际工程中,考虑到调度信号一般为功率信号,通常采用恒有功控制模式,稳态运行时主控器恒有功控制策略流程如图 5 所示.

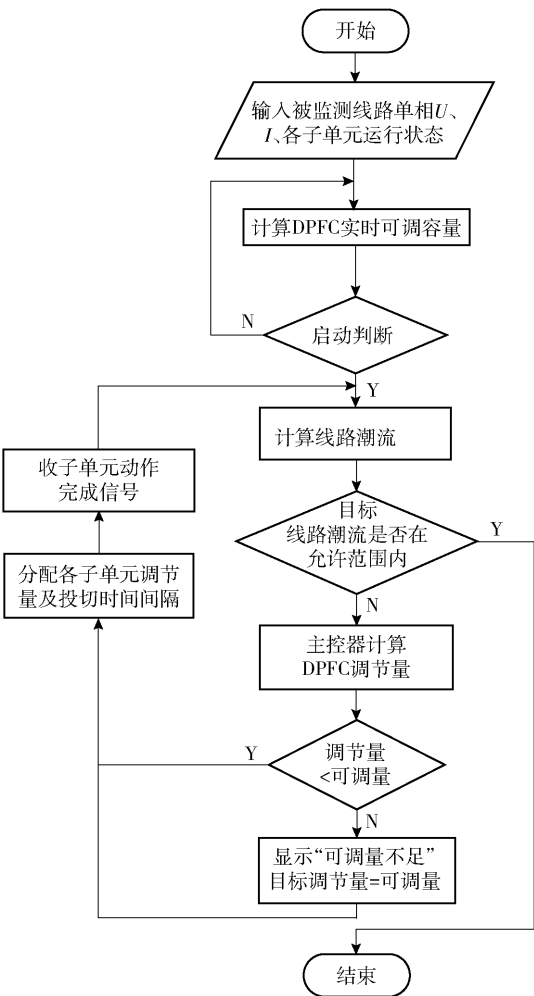


图5 恒有功潮流控制策略流程

1) 主控器实时采集 DPFC 所处线路的电压和电流的值,计算瞬时有功功率. 实时获取并显示各子单元运行状态信息,并计算出当前 DPFC 总可调容量,有

$$Q_{\text{adj}}^{\text{total}} = \min(Q_{\text{adj}}^i), \quad i = 0, 1, 2$$
$$Q_{\text{adj}}^i = \sum_{j=1}^n Q_j^i \lambda_j^i, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

(1)

其中: $Q_{\text{adj}}^{\text{total}}$ 、 $Q_{\text{adj}}^i$ 、 $Q_j^i$  分别为 DPFC 总可调容量、装设在第  $i$  相线子单元总可调量、 $i$  相线第  $j$  个子单元可调量; $\lambda_j^i$  为  $i$  相线第  $j$  个子单元的可控状态; $n$  为单相线路装设的总子单元个数;假定  $i=0$  为 A 相,  $i=1$  为 B 相,  $i=2$  为 C 相.

2) 主控器启动判断. 主控器的启动条件根据

主控器的运行模式而定,运行在调度控制模式时,主控器收调度下发的启动命令和目标潮流时启动;运行在自动控制模式时,监测的潮流越过阈值时,主控器启动.

3) 控制量计算. 启动瞬时有功功率与参考功率值  $P_{\text{ref}}$  比较,经 PI 控制生成参考控制量,并根据 DPFC 总可调容量修正控制总量.

4) 控制量信号传送到子单元. 根据计算的调节容量和全部子单元可调容量的关系,分配各子单元调节容量及投入顺序,根据无线传输的特点,尽可能采用由近区至远区的投入顺序.

5) 接收各子单元动作完成反馈信号,重新计算线路潮流,进行下一轮的控制计算.

6) 潮流控制满足终止条件判断. 满足条件则终止计算,本轮调节结束. 不满足则循环执行以上从 Step 3 开始的步骤.

3 仿真与结果

基于 GPRS 通信方式进行 DPFC 主控器控制效果 RTDS 硬件在环仿真验证. 实验中,输电线路采用某 220 kV 实际线路参数,如表 2 所示. 每 1.5 km 装设一组子单元,共需 30 组. 由于 RTDS 资源限制,在保持潮流不变的前提下,取线路的 1/10 做仿真验证,即线路中每个单相串接 3 组子单元,共 9 个,假设各子单元均处于正常工作状态且初始无输出.

仿真中 DPFC 子单元模型参数如表 3 所示.

表 2 实验线路参数表

电压等级/ kV	导线线型	单位长度三	单位长度三	线路长度/ km	导线分裂数
		相电阻值/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	相电抗值/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )		
220	LGJ-630/55	0.096 3	0.938	45	不分裂

表 3 子单元模型参数表

单匝变压器 电压比/ ( $V_{\text{rms}}/V_{\text{rms}}$ )	$C_0$ / $\mu\text{F}$	$C_1$ / $\mu\text{F}$	$L_1$ / mH	$L_2$ / mH	$V_2$ / V
60/600	3 600	40	0.6	0.2	1 000

主控器选择恒功率运行控制模式,仿真中的调节误差设置为调节目标的  $[0.98, 1.02]$  区间. 考虑实际中的通讯传输时延,线路子单元动作及线路状态响应的确认时间设置为 4 s.

感性调节实验时,RTDS 系统在 12 s 时向主控器下发目标线路电流 350 A 命令,主控器经 5 s 的线

路状态确认延时后启动调节过程. 容性调节实验时, RTDS 系统在 10 s 时向主控器下发目标线路电流 550 A, 同样地, 主控器经 5 s 的线路状态确认延时后启动调节过程.

图 6 和图 7 所示为子单元的容性调节过程. 主控器 17 s 时刻启动, 85 s 结束, 共动作 17 轮次, 装置向子单元下发的电压参考值由 0 增加到 417 V (负数表示容性输出). 线路初始电流 445 A, DPFC 动作完后, 最终线路电流维持在 357 A 附近, 达到预期效果.

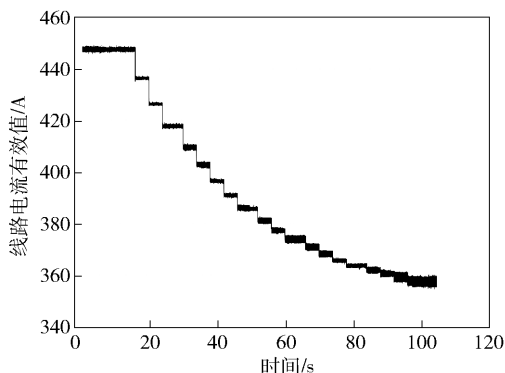


图 6 DPFC 潮流控制响应图(感性调节)

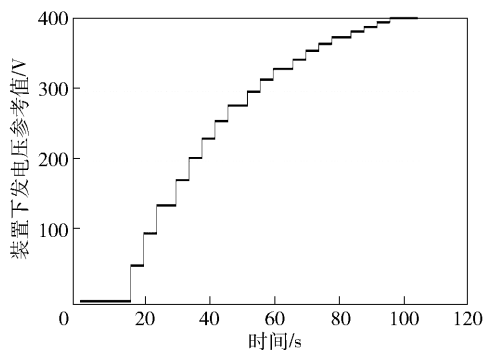


图 7 子单元 1A 收主控器电压参考控制信号

图 8 和图 9 所示为子单元的感性调节过程. 主控器 15 s 时刻启动, 87 s 结束, 共动作 18 轮次, 装置

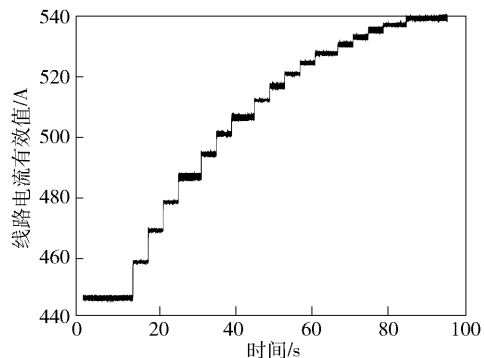


图 8 DPFC 潮流控制响应图(容性调节)

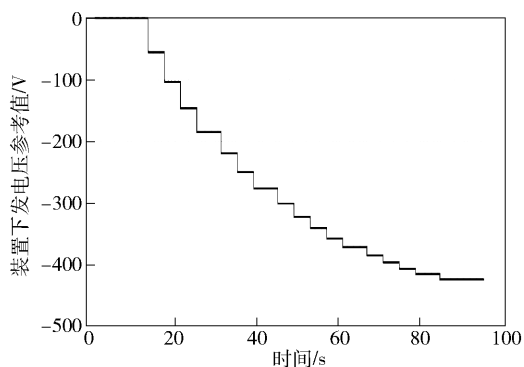


图 9 子单元 1A 收主控器电压参考控制信号

向子单元下发的电压参考值由 0 增加到 408 V. DPFC 的感性调节将线路电流由 445 A 提升到 541 A, 也达到了预期效果. 仿真与实验证明了主控器 DPFC 潮流控制作用的有效性.

图 10 所示为容性调节实验后子单元输出电压与电流曲线. 由图可知, 子单元 1 A 输出电压滞后于 A 相电流接近  $90^\circ$ , 由于子单元电容侧电压需要 D 轴电压维持, 所以子单元输出电压未能呈现纯容性.

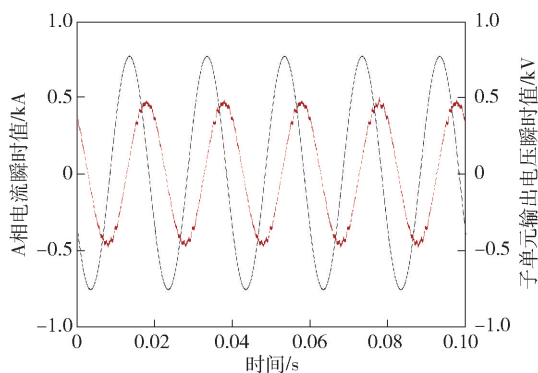


图 10 子单元 1 A 输出电压曲线

## 4 结束语

针对 DPFC 子单元小型化、分布式安装的特点, 从系统层面集中控制的角度设计的 DPFC 系统方案, 具有较好的创新性, 工程可行性较高, 具有以下 3 个显著优势.

1) 以无线通信组网 (GPRS 与 LORA 互为备用) 的方式实现主控制器与子控制单元的信息和命令交互, 可以保证信息传输的及时性和可靠性, 实际的测试已验证了方案的有效性, 增加了通过分布式潮流控制器进行潮流控制的工程可行性.

2) 主从控制的控制方式灵活方便. 在系统层

面对线路串联补偿控制单元进行统一协调控制,以集中控制的方法调度和配置可用资源,通过反馈控制手段进行跟踪调节,能够以多种工作模式对线路潮流进行控制,丰富了 DPFC 方案的应用场景,增强了其灵活性。

3) 基于小容量 DPFC 子单元,提出了系统级控制策略,并通过仿真实验,证实了基于恒功率运行控制模式下,主控器潮流控制作用良好,具有广阔的工程应用前景。

## 参考文献:

- [1] 张晓宇,顾乔根,文继锋,等. 统一潮流控制器系统串联变压器保护设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 72-77.  
Zhang Xiaoyu, Gu Qiaogen, Wen Jifeng, et al. Series transformer protection design in unified power flow controller system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 72-77.
- [2] Musunuri S, Dehnavi G. Comparison of STATCOM, SVC, TCSC, and SSSC performance in steady state voltage stability improvement [C] // North American Power Symposium 2010. New York: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [3] Brissette A, Maksimovic D, Levron Y. Distributed series static compensator deployment using a linearized transmission system model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1269-1277.
- [4] Divan D M, Brumsickle W E, Schneider R S, et al. A distributed static series compensator system for realizing active power flow control on existing power lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 642-649.
- [5] 唐爱红,卢俊,宣俭,等. 分布式潮流控制器对系统功率控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 15-20, 26.  
Tang Aihong, Lu Jun, Xuan Jian, et al. Study of the power control ability of the distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 15-20, 26.
- [6] 冯雅. 基于蚁群算法的分布式潮流控制器最优投切研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [7] 袁玮. 分布式潮流控制器的控制特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [8] 李顺,唐飞,刘涤尘,等. 分布式潮流控制器提升最大输电能力期望和供电可靠性的效能研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1573-1579.  
Li Shun, Tang Fei, Liu Dichen, et al. Research on efficiency of distributed power flow controller to improve expected

total transfer capability and power supply reliability [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1573-1579.

- [9] 汤奕,刘煜谦,宁佳,等. 基于两阶段优化的分布式潮流控制器配置方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 141-147.  
Tang gi, Liu Yuqian, Ning Jia, et al. Placement method for distributed power flow controller based on two-stage optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 141-147.
- [10] 徐雨田,刘涤尘,黄涌,等. 用于提高输电均衡性的 DPFC 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 94-102.  
Xu Yutian, Liu Dichen, Huang Yong, et al. DPFC optimization configuration strategy for increasing transmission equilibrium[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 94-102.
- [11] 赵静,苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21): 50-57.  
Zhao J, Su Guangtian. Analysis on LoRa wireless network technology[J]. Mobile Communications, 2016, 40(21): 50-57.
- [12] 张娜. 基于 GPRS 的电力负荷管理系统的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [13] 张高群. 电力系统应用 ZigBee 技术初步研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 83-86, 107.  
Zhang Gaoqun. Preliminary study of application ZigBee technology in electrical power system [J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(11): 83-86, 107.
- [14] 苑津莎,高会生,孙逸群,等. 电力光纤通信网的安全性评估指标体系[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 960-964.  
Yuan Jinsha, Gao Huisheng, Sun Yiqun, et al. Security evaluation indicator system for electric power optical-fiber communication network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 960-964.
- [15] 宋锦海,宣筱青,朱开阳,等. 基于 IEC 61850 的安全稳定控制装置方案设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 72-75, 80.  
Song Jinhai, Xuan Xiaqing, Zhu Kaiyang, et al. Design of security and stability control device based on IEC 61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 72-75, 80.
- [16] 谭文恕. 电力系统无缝通信系统体系[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 1-5.  
Tan Wenshu. Seamless communication architecture in power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 1-5.