

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.005

## 基于集中控制的分布式潮流控制器策略研究

钟亮民<sup>1,2</sup>, 陈涵<sup>1,2</sup>, 赵静波<sup>3</sup>, 封科<sup>1,2</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211106;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

**摘要:**作为解决柔性交流输电系统(FACTS)装置可靠性低、维护成本高等问题的可靠手段,分布式柔性交流输电技术(D-FACTS)以其灵活快速的特点成为 FACTS 研究的热点方向。文中从分布式串联电抗器(DSR)和分布式静止串联补偿器(DSSC)的结构和原理出发,将 DSSC 和 DSR 的工作方式相结合,得到分布式潮流控制器(DPFC)方案。该 DPFC 子控制单元使得阻抗调节兼具连续性和分级性的特点,在系统层面以集中控制的方式进行子单元整体投切和连续控制。文中提出了基于该方案的“DSSC+”集中控制、分布安装的 DPFC 系统架构,具体研究了基于在线负反馈的系统控制策略,并通过实时数字仿真算例验证了该策略的有效性,为该方案的工程应用提供理论支撑。

**关键词:**分布式串联电抗器;分布式静止串联补偿器;分布式潮流控制器;控制策略;实时数字仿真

**中图分类号:**TM726.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)01-0038-06

### 0 引言

潮流控制技术作为现代电力系统的前沿技术,是增强输电系统的可控性和灵活性、提高运行稳定性和经济性的重要手段<sup>[1]</sup>。柔性交流输电(flexible AC transmission systems, FACTS)是建立在电力电子或其他静止型控制器基础之上的、能提高可控性和增大电力传输能力的交流输电系统,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、频繁和大范围的调节<sup>[2-3]</sup>。

目前学界针对集中式 FACTS 进行了许多研究,主要是对 FACTS 安全性和可靠性的研究,以及在潮流控制中对保护动作影响的研究<sup>[4-6]</sup>。常见的用于潮流控制的大型集中式 FACTS 装置,比如静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC),晶闸管控制串联补偿器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)和统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)等,功能强大、结构复杂、占地面积较大、一次性投资成本巨大,对日常运行管理与检修维护的专业技术人员要求也较高<sup>[7]</sup>;且 FACTS 装置中控制保护系统、电力电子器件和冷却系统等可靠性距离电网运营公司的要求还有些差距<sup>[8]</sup>。

针对上述不足,美国佐治亚理工学院的 Divan

Deepak 教授等人最早提出了分布式柔性交流输电(distributed FACTS, D-FACTS)的概念。D-FACTS 的核心是小容量分布式串联补偿器,即 D-FACTS 控制器(D-FACTS controller, DFC)<sup>[9]</sup>。目前 D-FACTS 的研究延续了集中式 FACTS 的技术路线,大部分研究还处在理论验证阶段,主要集中在子模块的控制逻辑设计、布点方案等方面<sup>[10-11]</sup>。

文中首先阐述输电线路有功潮流控制的基本思路;然后,对 2 种主要的 D-FACTS 装置分布式串联电抗器(distributed series reactance, DSR)和分布式静止串联补偿器(distributed static series compensator, DSSC)的结构和原理进行说明。在此基础上,提出了一种以 DSSC 为核心,结合 DSR 特点的分布式潮流控制器(distributed power flow controller, DPFC)方案;最后从集中控制的角度研究了该 DPFC 子控制单元投切的控制策略,并通过仿真验证了策略的有效性。

### 1 分布式潮流控制技术

#### 1.1 有功潮流控制技术

图 1 为一个中短距离输电线路(小于 240 km)的单机无穷大电力系统。线路首端电压为  $U_1 \angle \delta_1$ , 末端电压为  $U_2 \angle \delta_2$ , 线路电流为  $I$ ,  $R$  和  $X$  分别为线路的等效电阻与电抗。在中高压输电线路中,一般电抗要远大于电阻(10 倍以上),所以在不影响精度的情况下,潮流计算中可以忽略电阻,通过该输电线的潮流由式(1)和式(2)决定<sup>[12-13]</sup>。

收稿日期:2019-06-25;修回日期:2019-08-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目“基于分布式潮流控制的输电网柔性交流潮流控制技术研究”

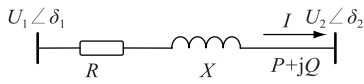


图1 输电线路简化电路

Fig.1 Simplified circuit diagram of transmission line

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_1 U_2}{X} \cos(\delta_1 - \delta_2) - \frac{U_2^2}{X} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知,输电线路潮流是首端与末端电压幅值、相角和线路阻抗的函数。如图2所示,串联型 FACTS 控制器通过增加或减小线路有效阻抗,从而改变流过线路的有功潮流,改善电力传输拥塞。传输线阻抗的改变有2种方法,一是在传输线上串联一个无源电容或电感(比如 TCSC);二是注入与传输线电流正交的电压(比如 SSSC)。

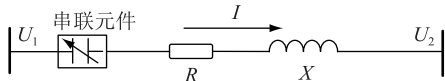


图2 串联元件接入输电线路等效电路

Fig.2 Equivalent circuit diagram of series components connected to transmission lines

1.2 DSR 的结构与原理

DSR 的结构示意如图3所示。每个 DSR 由单匝变压器、机械开关、取能电路、反并联晶闸管或双向晶闸管、控制保护模块及通信模块等组成。

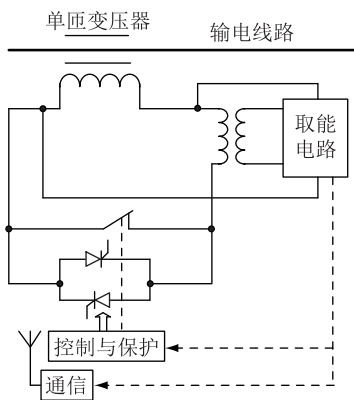


图3 DSR 结构示意

Fig.3 The structural diagram of DSR

单匝变压器的铁芯留有空气间隙,空气间隙的引入可使单匝变压器呈现出预期的励磁电感。单匝变压器的副边绕组并联一个常闭机械开关。当传输线没有电流或者电流比较小时,机械开关处于合闸状态。当传输线电流达到相应值后,取能电路就可以通过电流互感器取得足够的能量给控制保护模块和通信模块供电。控制保护模块检测传输线电流,当传输线电流越过预先设定的值后,控制

器发命令使机械开关分闸,然后由晶闸管快速地控制串联电感的投切。

1.3 DSSC 的结构与原理

DSSC 采用分布式的实现方案,将 SSSC 的大容量串补作用“化整为零”,即通过多个 DSSC 协同工作来实现单个 SSSC 的作用。从而大大减小单个 DSSC 的容量,利于批量生产,降低了成本,同时具有电压等级低、技术成熟等优势,多个 DSSC 协同工作还有利于实现线路的多目标控制。采用 DSSC 对单回线进行潮流控制的示意如图4所示。

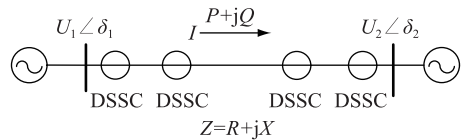


图4 DSSC 调节单回线潮流示意

Fig.4 The diagram of DSSC regulating single-line power flow

DSSC 的结构如图5所示。每个 DSSC 由单匝变压器、机械开关、取能电路、反并联晶闸管或双向晶闸管、滤波器、单相电压源逆变器、直流电容、控制保护模块和通信模块等组成。滤波器用于滤除逆变器输出的高频分量。与 DSR 不同,取能电路除可采用单匝变压器的副边电压和经过变换后的副边电流之外,还可以采用单相电压源逆变器的直流电容电压。DSSC 最独特的结构在于单匝变压器,单匝变压器使 DSSC 可以悬挂在已投入运行的线路上工作,不用将线路截断。

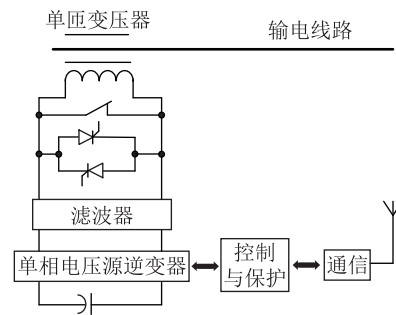


图5 DSSC 结构示意

Fig.5 The structural diagram of DSSC

当传输线没有电流或者电流比较小时,常闭机械开关处于合闸状态,确保单相电压源逆变器的安全。当传输线电流达到相应值后,单相电压源逆变器就可以正常工作,向传输线注入一个与输电线电流相差 90°的可控无功电压,以改变等效阻抗的方式控制线路潮流。当注入电压相位超前输电线电流 90°时,DSSC 呈电感特性,可以实现感性补偿;当注入电压相位滞后输电线电流 90°时,DSSC 呈电容

特性,可以实现容性补偿<sup>[3,8]</sup>。

DSSC 装置级控制如图 6 所示。 $U_{dc}$ ,  $U_{ref}$ ,  $I_{Line}$ ,  $U_{control}$  分别表示实际电压、参考电压、线路电流和控制电压。利用锁相环测量线路电流的相角,得到 DSSC 输出电压的相角基准。DSSC 输出的实际电压  $U_{dc}$  与接收的参考值  $U_{ref}$  比较,经过 PI 控制环节得到控制电压的相角和幅值,得到调制波<sup>[14-15]</sup>。

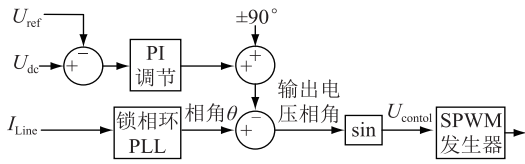


图 6 DSSC 装置级控制框图

Fig.6 Device level control block diagram of DSSC

## 2 分布式潮流控制策略研究

### 2.1 系统架构

将 DSSC 和 DSR 的工作方式相结合得到 DPFC 潮流控制方案,目前的 DPFC 系统方案主要通过以 DSR 或 DSSC 为子单元的方式实现,其中 DSSC 方式因具有连续调节能力而受到更多的实际应用关注。将 DSSC 与 DSR 的工作方式相结合,使得阻抗调节兼具连续性和分级性,可以快速且灵活地增加无功电压或直接改变电抗,从而控制输电线路的总有效阻抗,形成 DPFC 系统方案的“DSSC+”子控制单元。

如图 7 所示,该 DPFC 系统采用分布式安装、主从控制的方式实现,由 DPFC 子控制单元和主控制器组成。子控制单元为“DSSC+”概念的控制单元。主控制器安装在变电站内,以集中控制方式对所有子单元进行统一控制,系统若干个子控制单元和一个主控制器之间构建无线通信网络来交换数据。主控制器与能量管理系统之间通过电力通信网进行信息交换。

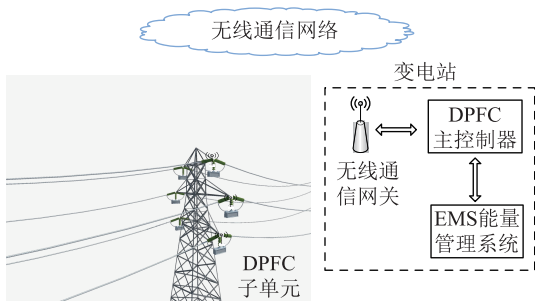


图 7 DPFC 方案系统结构

Fig.7 The system overall structure of DPFC

如图 8 所示,DPFC 子单元内部包含电压源换流器(voltage source converter, VSC), VSC 通过耦合变压器串联在输电电路上,能够连续或者分级快速

调节线路阻抗。DPFC 控制系统主要安装于多回输电线路及环形网络,在放射型网络中没有潮流调节能力。DPFC 主控制器是整个 DPFC 系统的运行中枢,主要承担的任务包括系统部署区域相关电网参数的获取与存储、DPFC 子单元的运行状态参数获取与存储、向 DPFC 子单元发送投切命令,以及执行能量管理系统下发的潮流控制任务。

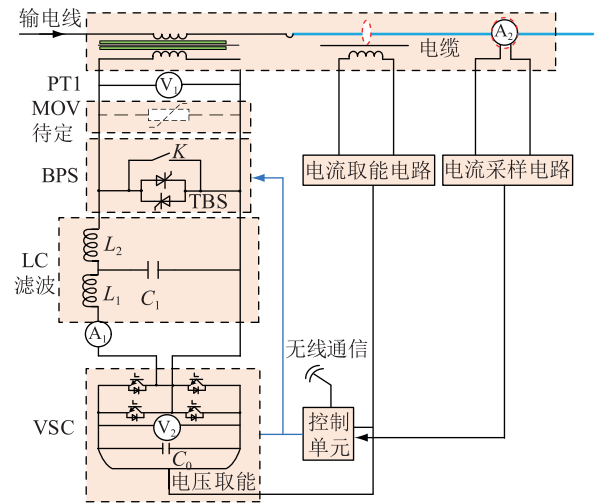


图 8 DPFC 子单元拓扑结构

Fig.8 The topology diagram of DPFC sub-control unit

### 2.2 控制策略

DPFC 的系统级控制策略决定了其补偿模式和调节特性,是运用 DPFC 进行潮流控制的核心。

DPFC 的系统级控制由主控制器实现。电网稳态运行时,主控制器根据运行人员设定的系统潮流调节目标及补偿模式确定线路上 DPFC 子单元的运行状态和输出容量,并通过无线通信给各 DPFC 子单元发送调节指令,从而调节系统潮流。在电网发生故障时,主控制器能及时识别故障,闭锁装置,防止子单元损坏。

主控制器主要有 3 种潮流控制模式:恒功率运行控制、恒阻抗运行控制和恒电压运行控制。实际工程中,考虑到调度信号一般为功率信号,因此通常采用恒有功功率控制模式,稳态运行时主控制器恒有功控制策略流程如图 9 所示。

步骤 1:主控制器实时采集 DPFC 所在线路的电压和电流,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,计算出当前 DPFC 总可调容量:

$$Q_{adj}^{total} = \min \left( \sum_{j=1}^n Q_j^i \lambda_j^i \right) \quad i = 0, 1, 2 \quad (3)$$

式中:  $Q_{adj}^{total}$ ,  $Q_j^i$  分别为 DPFC 总可调容量、第  $i$  相线第  $j$  个子单元可调量;  $\lambda_j^i$  为第  $i$  相线第  $j$  个子单元的

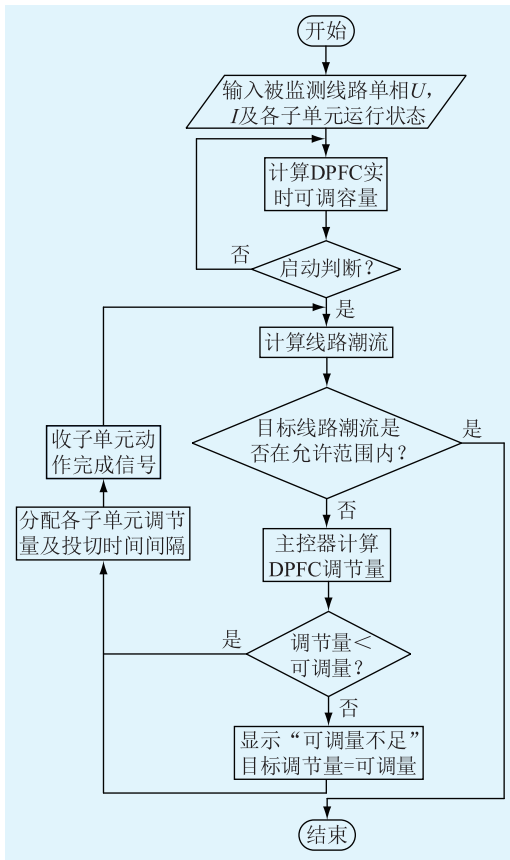


图9 恒有功潮流控制策略流程

Fig.9 The flow chart of the constant active power control strategy

可控状态; $n$  为单相线路装设的总子单元个数; $i$  取 0, 1, 2 时分别为 A 相、B 相、C 相。

步骤 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启动。

步骤 3: 控制量计算。启动瞬时有功功率与参考功率值  $P_{ref}$  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。

步骤 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, 考虑到无线传输的特点, 尽可能采用由近区至远区的投入顺序。

步骤 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。

步骤 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。不满足则返回步骤 3 循环执行。

### 3 仿真与结果

进行 DPFC 主控器控制效果验证的实时数字仿真 (real time digital simulator, RTDS) 实验, 输电线采用某 110 kV 实际线路参数, 线路两端母线电压为等效电压源。线路中串接 4 组子单元, 共 12 个, 假设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 1 所示, 实验系统示意如图 10 所示。

表 1 子单元模型参数表

Table 1 The simulation parameters for every sub-unit

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

主控器选择恒功率运行控制模式, 误差设置为 0.1 A, 1.5 s 时向主控器下发目标线路电流 466.3 A。

如图 11 所示, 线路初始电流 407 A, DPFC 动作后, 最终线路电流稳定在 466.32 A, 误差 0.02 A 小于设置的 0.1 A。主控器 1.5 s 时刻启动, 9.1 s 结束, 共动作三轮次, 其中第二轮动作间隔比第三轮长约 0.1 s, 是考虑到通信传输延时的结果。

图 12 所示为子单元 1A 的执行情况, 1.51 s 时

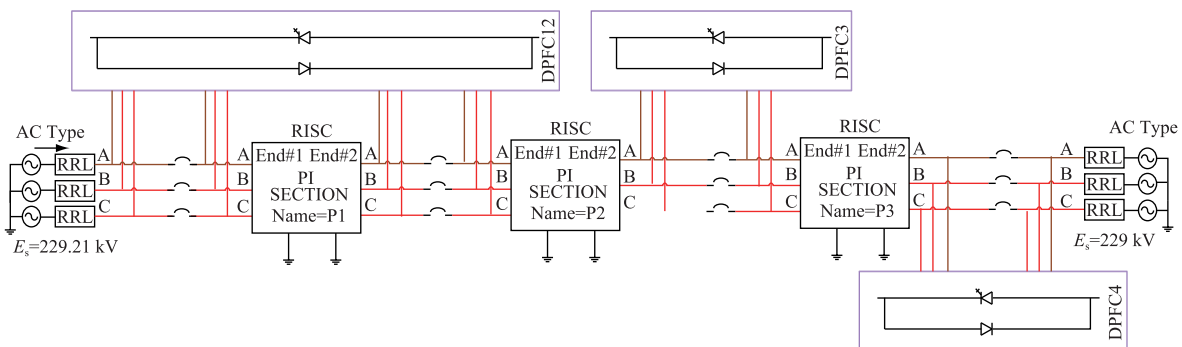


图 10 DPFC 在环仿真系统

Fig.10 The diagram of DPFC in-loop simulation system



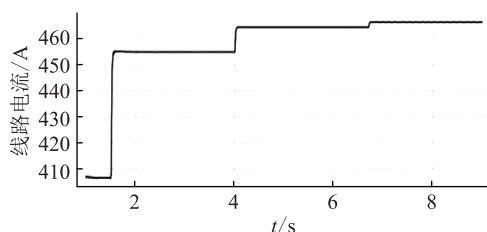


图 11 DPFC 潮流控制响应

Fig.11 The response curve of DPFC power flow control

子单元 1A 收到主控下发的动作执行命令和参考电压 $-0.8\text{ V}$ (表示容性)。图 13 为子单元 1A 输出电压,与理论计算相符。仿真验证了主控器 DPFC 潮流控制策略的有效性。

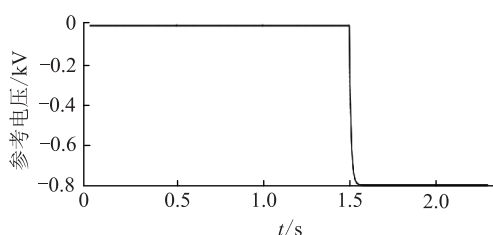


图 12 子单元 1A 收主控器电压参考控制信号

Fig.12 The control signals of reference voltage sub-unit 1A receives from the master controller

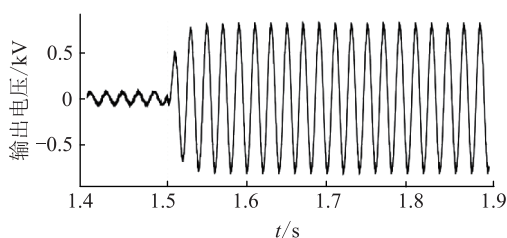


图 13 子单元 1A 输出电压曲线

Fig.13 The output voltage curve of sub-unit 1A

## 4 结语

文中从 DSR 和 DSSC 的结构出发,提出基于分布式串联补偿器的“DSSC+”分布式潮流控制器系统方案。通过研究 DPFC 系统的组网模式和系统级控制手段,验证了该系统方案的理论有效性和工程可行性。

(1) 在系统层面对线路串联补偿控制单元进行统一协调控制,以集中控制的方式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,增强了灵活性。

(2) 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,证实了恒功率运行控制模式下,主控器具有良好的潮流控制作用,具有

良好的工程应用前景。

## 参考文献:

- [1] YUAN Z, HAAN S W H D, FERREIRA J B, et al. A FACTS device: distributed power-flow controller (DPFC) [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2564-2572.
- [2] TANG Y, LIU Y, DAI J, et al. Research on steady state voltage stability of power system with distributed static series compensator [C]//IEEE Future Energy Electronics Conference and Ecce Asia, 2017: 1731-1735.
- [3] FAJRI P, AFSHARNIA S. A PSCAD/EMTDC model for distributed static series compensator (DSSC) [C]//IEEE International Conference on Electrical Engineering, 2008: 1-6.
- [4] 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, 112. 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, 112.
- [5] MUSUNURI S, DEHNAVI G. Comparison of STATCOM, SVC, TCSC, and SSSC performance in steady state voltage stability improvement [C]//IEEE North American Power Symposium, 2010: 1-7.
- [6] BRISSETTE A, MAKSIMOVI 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.
- [7] TAMBE P P, JOSHI K D. Power flow improvement using distributed static series compensator [J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2012, 1(4): 1-4.
- [8] KHALILIAN M, MOKHTARI M, GOLSHANNAVAZ S, et al. Distributed static series compensator (DSSC) for subsynchronous resonance alleviation and power oscillation damping [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2012, 22(5): 589-600.
- [9] 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, 2006, 22(1): 642-649.
- [10] 唐爱红, 高梦露, 黄涌, 等. 协调分布式潮流控制器串并联变流器能量交换的等效模型 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 30-36. TANG Aihong, GAO Menglu, HUANG Yong, et al. Equivalent model of coordinating energy exchange for series and shunt converters in distributed power flow controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 30-36.
- [11] 李顺, 唐飞, 廖清芬, 等. 基于多指标效能分析的分布式潮流控制器选址定容优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 60-65, 86. LI Shun, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Location and capacity optimization strategy of distributed power flow controller based on multi-indicator performance analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 60-

- 65,86.
- [12] RAYTHATHA K G, VYAS B Y. System parameters improvement of transmission line using distributed static series compensator (DSSC) [C]//IEEE International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2016; 459-463.
- [13] JALAYER R, MOKHTARI H. A simple three-phase model for distributed static series compensator (DSSC) in Newton power flow [C]//IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009; 1-5.
- [14] KHAZAIE J, MOKHTARI M, KHALILYAN M, et al. Sub-synchronous resonance damping using distributed static series compensator (DSSC) enhanced with fuzzy logic controller [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 80-89.
- [15] LI M, WANG Y, FANG X, et al. On high precision distributed series compensator control in static reference frame [C]//IEEE Processing of the 7th international power electronics and motion control conference, 2012; 94-98.

作者简介:



钟亮民

钟亮民(1987),男,硕士,工程师,从事电网安全稳定控制工作(E-mail: zhongliangmin@sgepri.sgcc.com.cn);

陈涵(1978),男,硕士,高级工程师,从事电网安全稳定控制工作;

赵静波(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统稳定分析工作。

### Strategy research of distributed power flow controller based on centralized control

ZHONG Liangmin<sup>1,2</sup>, CHEN Xiong<sup>1,2</sup>, ZHAO Jingbo<sup>3</sup>, FENG Ke<sup>1,2</sup>

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

2. NARI Technology Co.,Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** As a means to solve the problems of low reliability and high maintenance cost of flexible AC transmission system (FACTS) devices, distributed flexible AC transmission system (D-FACTS) has become a research hotspot in FACTS area with its flexible and rapid features. Based on the structures and principles of distributed series reactor (DSR) and distributed static series compensator (DSSC), a distributed power flow controller (DPFC) scheme is proposed in this paper. The DPFC sub-control unit makes the impedance adjustment of transmission lines both continuous and hierarchical. At the system level, the overall switching and continuous control of the sub-units are carried out by centralized control. Based on the scheme, the structure of a "DSSC+" type DPFC system is proposed, which has the feature of centralized control and distributed installation. The system control strategy based on online negative feedback is studied in detail. The simulation results verify the effectiveness of the strategy which can provide theoretical support for engineering applications.

**Keywords:** distributed series reactor; distributed static series compensator; distributed power flow controller; control strategy; real time digital simulator

(编辑 陈静)