

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226439

## 适用于多端柔性直流电网的潮流控制器

张成泉, 邹贵彬, 张烁, 魏秀燕

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 多端柔性直流电网以优良的性能在清洁能源消纳方面发挥了重要作用, 但其潮流难以灵活控制, 需引入潮流控制器来改善潮流分布。对此, 提出了一种适用于多端柔性直流电网的新型直流潮流控制器, 其具有配置成本低、调节范围广和运行损耗小的优势。潮流控制器利用全控型开关动态投切电容、电阻来改变线路等效电阻, 实现了潮流控制功能。此外, 设计了含电压限制环节和电流差增益环节的控制策略, 降低了拓扑的配置成本和运行损耗。最后, 通过电磁暂态仿真与低压物理试验验证了所提直流潮流控制器的有效性与可行性。

**关键词:** 多端柔性直流电网; 潮流控制器; 控制策略; 参数选择; 模块化结构

### A current flow controller suitable for MTDC grids

ZHANG Chengquan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, WEI Xiuyan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The multi-terminal flexible DC grid has an important role in integrating renewable energy owing to its excellent advantages. However, the current flow in a multi-terminal flexible DC grid cannot be controlled flexibly, so a current flow controller is required to improve the distribution. Therefore, this paper presents a new topology of current flow controller suitable for a multi-terminal flexible DC grid. It has the advantages of low implementation cost, wide adjustment range, and low operational power loss. The current flow controller uses the switch to dynamically insert the capacitance and resistance to change the line equivalent resistance. This realizes the current flow control function. The control system including voltage limiting link and current difference gain link is designed to reduce the implementation cost and operational power loss. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed DC current flow controller are verified by electromagnetic transient simulation and low voltage physical experiment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077124).

**Key words:** multi-terminal flexible DC grid; current flow controller; control strategy; parameter selection; modular structure

## 0 引言

随着环境恶化和化石能源短缺问题日益凸显, 太阳能、风能等清洁能源越来越受到青睐。目前, 基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的多端柔性直流输电技术具备有功无功快速独立可控、无需无功补偿、输送容量大和输送距离远等优点<sup>[1-5]</sup>, 在新能源消纳和传输方面展现了独特的优势, 具有广阔的发展前景<sup>[6-10]</sup>。

多端柔性直流电网中的 VSC 型换流站具备良好的可控性, 当系统中线路较少时, 可以通过换流

站级的控制在一定范围内调节潮流<sup>[11-13]</sup>。主从控制的直流电网可以通过上层能量管理调节系统的潮流分布, 下垂控制的直流电网可以通过设备自身的调节实现潮流控制。但当线路数目( $n$ )大于换流站数目( $b$ )时, 部分线路( $n-b+1$ )的潮流仅通过换流站级是无法进行控制的, 此时电网需要配置直流潮流控制器(current flow controller, CFC)来合理分配系统的潮流。电网配置直流潮流控制器具有以下优势: 1) 可以实现电网安全、优质和经济运行; 2) 在不增设输电走廊的情况下, 增加系统的传输容量, 降低输电通道建设的投资; 3) 重新分配功率, 避免线路功率越限, 提高系统运行的安全性和稳定性; 4) 优化系统的潮流分布, 减少电能传输过程的损耗。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077124)

文献[14-20]提出了不同的直流潮流控制器拓扑, 根据运行原理, 其可以分为可变电阻型、DC/DC变换型和线间直流潮流控制器。可变电阻型直流潮流控制器通过改变线路电阻来控制潮流, 如文献[16]通过全控型开关调节电阻串入线路的时间来改变线路的等效电阻, 进而调节系统的潮流, 该方案简单, 但调节能力有限。DC/DC变换型直流潮流控制器通过在直流线路中串入可调的直流电压来控制线路潮流, 如文献[17]利用模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)获得直流电压, 实现了线路潮流的双向控制。但该方案成本高, 且易受外部系统影响。而线间直流潮流控制器可以控制相邻线路进行功率交换, 避免了与外部系统的联系。H桥型线间直流潮流控制器由电容和8组全控型开关组成<sup>[18]</sup>, 利用开关控制电容在线上动态投切, 等效在线上施加了可调的电压源, 达到潮流控制的目的。但该方案控制复杂, 且需要较多昂贵的全控型开关。

基于上述问题, 本文提出了一种适用于多端柔性直流电网的潮流控制器。首先, 本文详细介绍了潮流控制器的拓扑与运行原理; 然后, 给出了潮流控制器的控制策略; 同时, 利用电磁暂态仿真模型和低压物理试验平台分别验证了潮流控制器的运行效果。最后, 通过与其他直流潮流控制器对比, 证明了本文所提方案的优势。其逻辑架构如图1所示。

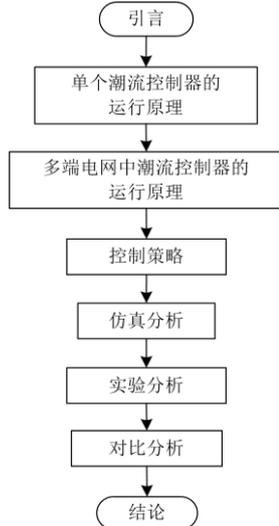


图1 逻辑架构图

Fig. 1 Diagram of logic architecture

## 1 潮流控制器拓扑与运行原理

本文提出的潮流控制器由整流桥和潮流控制模块(current flow controller module, CFCM)组成, 其完整拓扑和等效拓扑如图2所示。其中: 整流桥由4

组二极管构成, 为电流提供了一个双向的低损耗通路; 潮流控制模块包括电容  $C_p$ 、二极管  $D_p$ 、电阻  $R_p$  和绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)构成的开关  $S_p$ 。

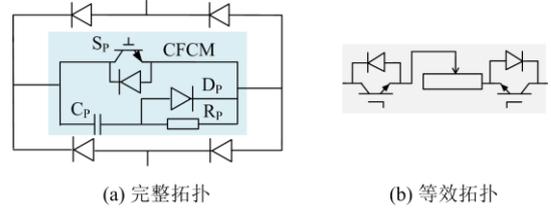


图2 潮流控制器拓扑和等效拓扑

Fig. 2 Topology of power flow controller and equivalent circuit

潮流控制器进行潮流控制时开关  $S_p$  受斩波信号控制, 若控制信号的占空比为  $D$ , 则在一个周期  $T$  内, 开关  $S_p$  导通的时间为  $DT$ , 开关  $S_p$  关断的时间为  $(1-D)T$ 。开关  $S_p$  关断时二极管  $D_p$  将电阻短路, 线路电流通过二极管  $D_p$  给电容充电, 如图3(a)所示。系统中存在电感且充电时间短, 因此可以认为电容电流为恒定的线路电流。

$$U_{Edn} - U_{Ben} = \frac{1}{C} \int_{DT}^T i_c dt = \frac{(1-D)IT}{C} \quad (1)$$

式中:  $U_{Ben}$  和  $U_{Edn}$  分别为电容充电过程的起始电压和结束电压;  $C$  为电容;  $i_c$  为电容电流;  $I$  为线路电流。

如图3(b)所示, 开关  $S_p$  导通时, 线路电流会通过开关  $S_p$ , 二极管  $D_p$  承受反向电容电压关断, 电容通过开关  $S_p$  和电阻  $R$  放电, 电容电压呈指数下降。

$$U_{Bef} - U_{Edf} = U_{Bef} (1 - e^{-\frac{DT}{RC}}) \quad (2)$$

式中,  $U_{Bef}$  和  $U_{Edf}$  分别为电容放电过程的起始电压和结束电压。

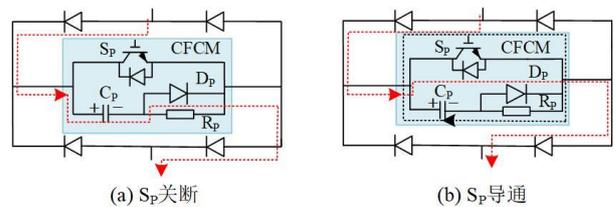


图3 电流路径

Fig. 3 Current flow path

潮流控制器稳态运行时的电容电压应该维持动态稳定, 即  $U_{Bef} = U_{Edn}$ 、 $U_{Edf} = U_{Ben}$ , 可得:

$$I = \frac{U_{Edn} (1 - e^{-\frac{DT}{RC}}) C}{(1-D)T} \quad (3)$$

开关  $S_p$  关断时, 潮流控制器的电压为电容电

压；开关  $S_P$  导通时，潮流控制器的电压为 0(忽略开关的压降)。因此，可以用潮流控制器在一个周期内的平均电压作为其等效电压。

$$U_{Eq} = \frac{\int_0^{DT} 0 dt + \int_{DT}^T u_c dt}{T} = \frac{(U_{Edn} + U_{Ben})(1-D)}{2} \quad (4)$$

式中， $U_{Eq}$  为潮流控制器的等效电压。

系统稳定运行后，潮流控制器的电流为线路电流  $I$ ，因此潮流控制器的等效电阻  $R_{Eq}$  为

$$R_{Eq} = \frac{U_{Eq}}{I} = \frac{(1 + e^{-\frac{DT}{RC}})(1-D)^2 T}{2(1 - e^{-\frac{DT}{RC}})C} \quad (5)$$

由式(5)可知，在确定潮流控制器各元件的参数后，潮流控制器可以视为受开关  $S_P$  占空比影响的可变电阻。

假设直流潮流控制器应用于多端网格状柔性直流系统(图4)，各潮流控制器可以协调控制系统潮流。为了便于分析，对直流系统进行了以下简化<sup>[15]</sup>：

- 1) 直流电网采用主从控制策略；
- 2) 换流站  $MMC_0$  为电压主站，采用定电压控制，视为理想电压源；
- 3) 换流站  $MMC_1$ — $MMC_n$  为功率从站，采用定功率控制，视为理想电流源；
- 4) 忽略电力电子开关的导通压降；
- 5) 输电线路采用电阻等效。

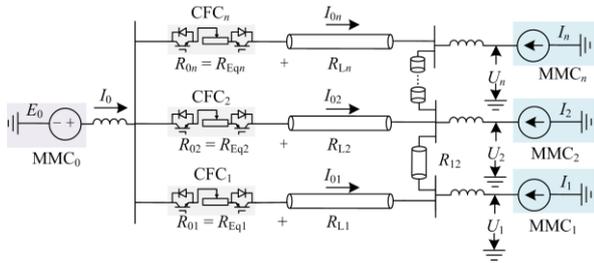


图 4 直流系统简化图

Fig. 4 Simplified diagram of MTDC system

由上述的分析可知，潮流控制器可以等效为受开关  $S_P$  占空比控制的等效电阻。因此，换流站  $MMC_0$  和其他换流站间的等效电阻  $R_{0k}$  可以表示为潮流控制器等效电阻  $R_{Eqk}$  和线路电阻  $R_{Lk}$  之和。根据图 4 所示的系统简化图，可以得到式(6)的节点电压方程。

$$\begin{cases} (\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{12}} + L + \frac{1}{R_{1n}})U_1 - \frac{1}{R_{12}}U_2 + L - \frac{1}{R_{1n}}U_n = I_1 + \frac{1}{R_{01}}E_0 \\ -\frac{1}{R_{21}}U_1 + (\frac{1}{R_{02}} + \frac{1}{R_{21}} + L + \frac{1}{R_{2n}})U_2 + L - \frac{1}{R_{2n}}U_n = I_2 + \frac{1}{R_{02}}E_0 \\ \vdots \\ -\frac{1}{R_{n1}}U_1 - \frac{1}{R_{n2}}U_2 + L + (\frac{1}{R_{0n}} + \frac{1}{R_{n1}} + L + \frac{1}{R_{n,n-1}})U_n = I_n + \frac{1}{R_{0n}}E_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $E_0$  为换流站  $MMC_0$  的电压； $I_1$ — $I_n$  为换流站  $MMC_1$ — $MMC_n$  的输出电流。

矩阵形式为

$$YU = I + Y_0E_0 \quad (7)$$

式中： $Y$  为线路导纳矩阵； $U$  为换流站电压矩阵； $I$  为换流站输出电流矩阵； $Y_0$  为  $MMC_0$  和其他换流站之间的导纳矩阵； $E_0$  为  $MMC_0$  的电压矩阵。

由于  $Y$ 、 $I$ 、 $E_0$  已知，则换流站电压可表示为

$$U = Y^{-1}I + Y^{-1}Y_0E_0 \quad (8)$$

式中， $Y^{-1}$  为  $Y$  的逆矩阵。

求得换流站电压后，可继续求解线路电流  $I_n$ ：

$$I_n = Y_0E_0 - Y_0U \quad (9)$$

式中， $I_n$  为线路电流  $I_{01}$ — $I_{0n}$  的矩阵。

将式(8)代入式(9)可得：

$$I_n = Y_0E_0 - Y_0Y^{-1}I - Y_0Y^{-1}Y_0E_0 \quad (10)$$

由式(10)可知， $I_{01}$ — $I_{0n}$  受直流潮流控制器等效电阻控制，且式(5)表明潮流控制器的等效电阻受开关  $S_P$  占空比控制，因此调节占空比  $D_1$ — $D_n$  就可以控制线路电流  $I_{01}$ — $I_{0n}$ 。

## 2 潮流控制器控制策略

潮流控制器采取的控制策略如图 5 所示。开关  $S_{P1}$ — $S_{Pn}$  的控制信号为  $S_1$ — $S_n$ ，选取电流作为控制目标，采用电流负反馈控制。潮流控制器的开关  $S_P$  需承受电容上的最大电压，电容最大电压越高，则开关  $S_P$  串联的 IGBT 数目也越多，潮流控制器的配置成本也越高。因此为了降低潮流控制器的配置成本，电容最大且电压不能过高。由式(3)可知，电容最大，电压与占空比成反比，若要潮流控制器电容最大电压  $U_{Cmax} \leq U_{rc}$ ，则开关  $S_P$  的占空比应该满足  $D \geq D_{min}$ 。因此控制系统增加了电压限制环节，电压限制环节可以将开关  $S_P$  的占空比限制在  $D_{min}$  到 1 之间，降低了潮流控制器的配置成本。

同时为了降低潮流控制器的运行损耗，在电压限制环节之后增加了电流差增益环节  $D_{Ek} = [0, 0, L, 1, L, 0]$ 。目标电流  $I_{01ref}$ — $I_{0nref}$  和自然潮流差值最大线路对应的电流差增益  $D_{Ei}$  为 1，其余线路的  $D_{Ej}$  均为 0。由于占空比  $D_i$  的取值在  $D_{min}$  到 1 之间，因此附加了电流差增益环节后，潮流控制器  $CFC_i$  的占空比大于等于 1，即潮流控制器  $CFC_i$  的开关  $S_P$  保持导通。此时潮流控制器  $CFC_i$  提供的等效电阻为 0，降低了潮流控制器的运行损耗。

系统稳态运行时换流站  $MMC_1$ — $MMC_n$  吸收功率恒定，为满足功率平衡的要求，换流站  $MMC_0$  输

出的总功率必须恒定, 并且 MMC<sub>0</sub> 采用定电压控制, 其电压恒定, 因此 MMC<sub>0</sub> 输出的电流恒定。对于 MMC<sub>0</sub> 的  $n$  条出线, 为了满足功率平衡的要求, 只有  $n-1$  个电流可以独立控制。因此, 控制系统选择第  $n$  条线路作为平衡点来满足功率平衡的要求。

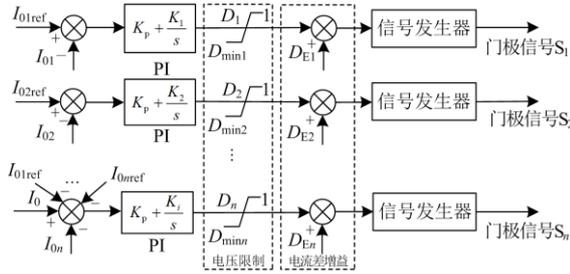


图 5 控制策略方框图

Fig. 5 Diagram of control strategy

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真模型

为了验证潮流控制器的有效性, 本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了四端 MMC-HVDC 仿真模型, 如图 6 所示。四端柔性直流电网模型采用主从控制策略, 换流站 MMC<sub>0</sub> 为电压主站, 采用定电压控制; 换流站 MMC<sub>1</sub>—MMC<sub>3</sub> 为功率从站, 采用定有功功率控制。各换流站出口处均配置限流电感  $L$  (100 mH), 直流线路采用分布式依频模型<sup>[21]</sup>。换流站 MMC<sub>0</sub> 的所有出线均配置本文提出的潮流控制器, 系统的部分参数如表 1 所示。

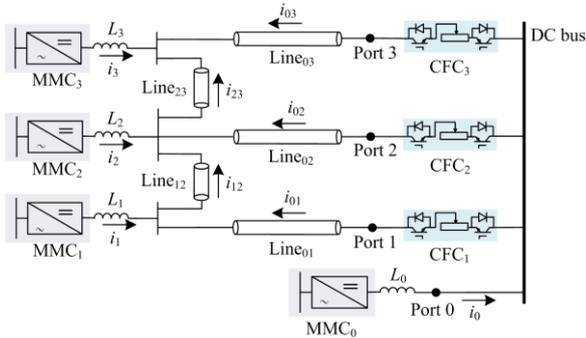


图 6 四端 MMC-HVDC 仿真模型

Fig. 6 Simulation model of four-terminal MMC-HVDC

#### 3.2 仿真结果

为了验证直流潮流控制器的有效性和可行性, 进行了如下 3 个阶段的仿真。

##### 1) $t < 1$ s

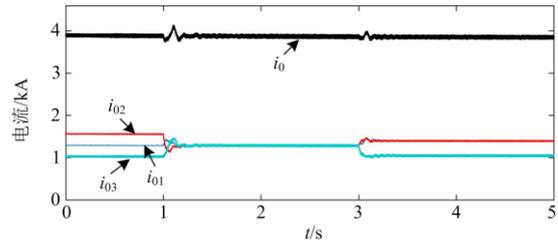
直流潮流控制器在 0~1 s 内运行在旁路模式, 各潮流控制模块的开关  $S_P$  保持导通, 潮流控制器仅作为低损耗的双向通路。此时, 潮流分布只受系统

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

参数	取值
MMC <sub>0</sub> 额定电压/kV	500
MMC <sub>1</sub> —MMC <sub>3</sub> 额定功率/MW	450, 900, 550
子模块电容/mF	15
桥臂子模块数	250
桥臂电感/mH	29
Line <sub>01</sub> —Line <sub>03</sub> , Line <sub>12</sub> , Line <sub>23</sub> 线路长度/km	200, 120, 100, 180, 160
最小占空比 $D_{min}$	0.4
CFCM 电容/ $\mu$ F	30
CFCM 电阻/ $\Omega$	5

参数的影响, 各线路电流为:  $i_0 = 3.9$  kA,  $i_{01} = 1.29$  kA,  $i_{02} = 1.57$  kA,  $i_{03} = 1.04$  kA, 如图 7 所示。

图 7 Line<sub>01</sub>—Line<sub>03</sub> 电流Fig. 7 Current of Line<sub>01</sub>—Line<sub>03</sub>

##### 2) $1 \text{ s} < t < 3 \text{ s}$

1 s 时, 利用潮流控制器将线路 Line<sub>01</sub>—Line<sub>03</sub> 的电流控制到相同的值(1.3 kA)。在控制系统的作用下, 电流迅速被控制到目标值, 如图 7 所示。由控制系统部分的分析可知, 此时潮流控制器 CFC<sub>3</sub> 的电流差增益  $D_{E3}$  应该为 1, 开关  $S_{P3}$  保持导通, 开关  $S_{P1}$ — $S_{P3}$  的控制信号  $S_1$ — $S_3$  如图 8(a)所示(这里选取 2 s 的仿真波形, 此时系统已经稳定), 仿真结果证明了所提控制系统的有效性。

潮流控制器中电容的电压  $v_{C1}$ — $v_{C3}$  和电流  $i_{C1}$ — $i_{C3}$  分别如图 8(b)和图 8(c)所示, 开关  $S_P$  关断时, 线路电流给电容充电, 电容电流为恒定的线路电流, 电容电压线性上升, 且上升速率为  $I/C$ ; 开关  $S_P$  导通时, 电容通过电阻和开关  $S_P$  构成 RC 放电回路, 电容电流反相且呈指数上升, 电容电压呈指数下降。潮流控制器稳定运行后, 电容充电结束, 电压等于放电起始电压, 电容电压维持动态稳定。

开关  $S_P$  的电压  $v_{S1}$ — $v_{S3}$  和电流  $i_{S1}$ — $i_{S3}$  如图 8(d)与图 8(e)所示。开关  $S_P$  关断时,  $S_P$  的电压与电容电压相同, 电流为 0; 开关  $S_P$  导通时,  $S_P$  的电压为 0,  $S_P$  的电流为线路电流和电容电流之和。潮流控制器中各元件电气量的仿真结果均与理论分析部分吻合。

3)  $3\text{ s} < t < 5\text{ s}$

3 s 时, 潮流控制器再次将线路 Line<sub>01</sub> 和 Line<sub>02</sub> 的电流控制到相同的值(1.43 kA)。

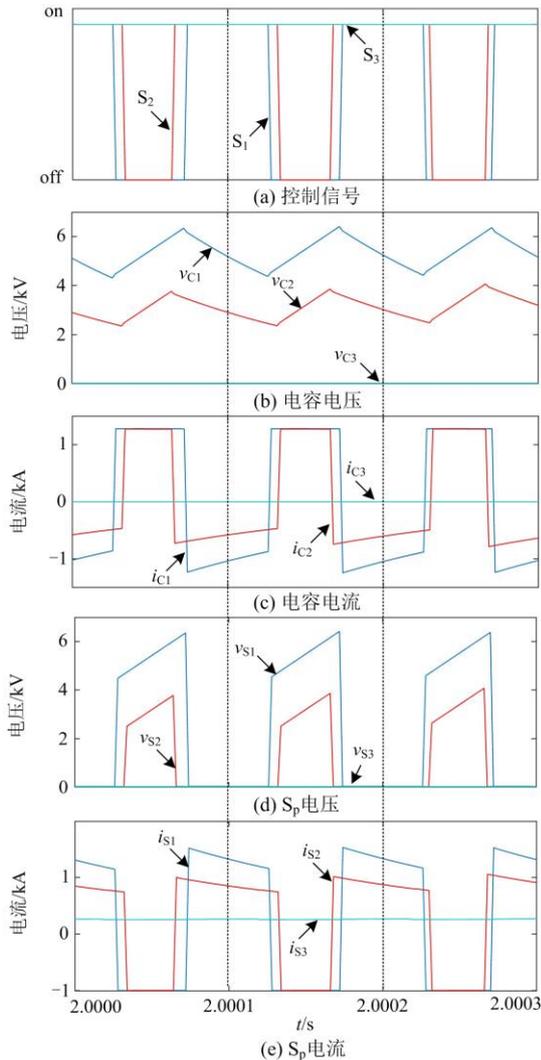


图 8 仿真结果

Fig. 8 Simulation results

## 4 试验分析

### 4.1 试验电路

为了验证潮流控制器的功能, 搭建了如图 9 所示的低压物理试验电路。试验中电流仅单向流动, 所以可以省略由二极管构成的电流桥。试验采用电阻  $R_L$  和电感  $L_L$  的串联模型模拟输电线路, 利用直流电源  $U_{dc}$  替代换流站 MMC<sub>0</sub>, 负载  $R_1-R_3$  替代换流站 MMC<sub>1</sub>-MMC<sub>3</sub>。为了抑制故障电流的上升速率, 在电源出口处配置了限流电感  $L$ 。同时, 试验电路设置了保护开关  $S_{ctr}$ , 若试验发生故障, 可及时切断电路。试验电路的其他参数见表 2, 电路对应的低压物理试验平台如图 10 所示。

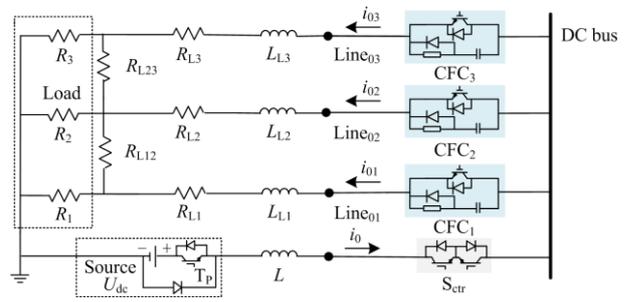


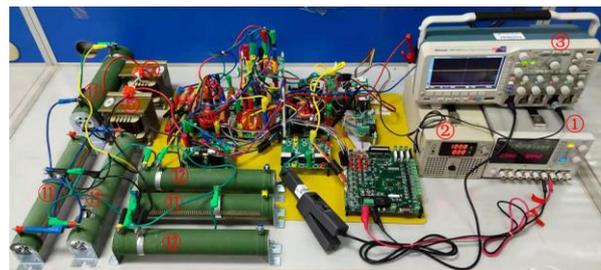
图 9 低压试验电路

Fig. 9 Low-voltage physical experiment circuit

表 2 低压试验电路参数

Table 2 Low-voltage physical experiment circuit parameters

参数	取值
电源电压 $U_{dc}/V$	100
电路电阻 $R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}, R_{L12}, R_{L23}/\Omega$	1.5, 1.5, 1.5, 2, 2
限流电感 $L/mH$	20
线路电感 $L_{L1}, L_{L2}, L_{L3}/mH$	2,2,2
最小占空比 $D_{min}$	0.4
控制电源/V	24
控制芯片	TMS320F28069



①控制电路电源 ②主电路电源 ③示波器 ④控制电路 ⑤电感  
⑥CFC电容 ⑦CFC电阻 ⑧IGBT和二极管 ⑨线路电阻  
⑩线路电感 ⑪负载电阻 ⑫线间电阻

图 10 低压物理试验平台

Fig. 10 Platform of low-voltage physical experiment

### 4.2 参数试验

潮流控制器的运行效果与电阻、电容的大小有关, 为了使潮流控制器获得较大的电流调节范围和较低的配置成本, 首先要选取合适的电阻值和电容值。因此, 进行了如下参数试验, 检验电阻和电容对潮流控制器运行特性的影响, 试验结果如图 11 和图 12 所示。

电阻对潮流控制器控制范围和电容最大电压的影响如图 11 所示, 电阻取值为  $0.5\ \Omega$ 、 $1\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 、 $5\ \Omega$ 、 $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 、 $40\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 。由于占空比  $D$  有最小值限制, 所以电阻越大, 电流的控制范围越大。随着占空比的增大, 潮流控制器电容最大,

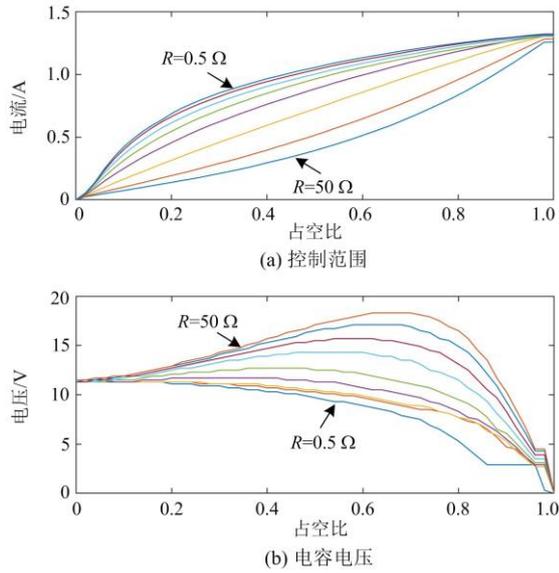


图 11 电阻对潮流控制器运行特性的影响

Fig. 11 Effect of resistor on operation characteristics of current flow controller

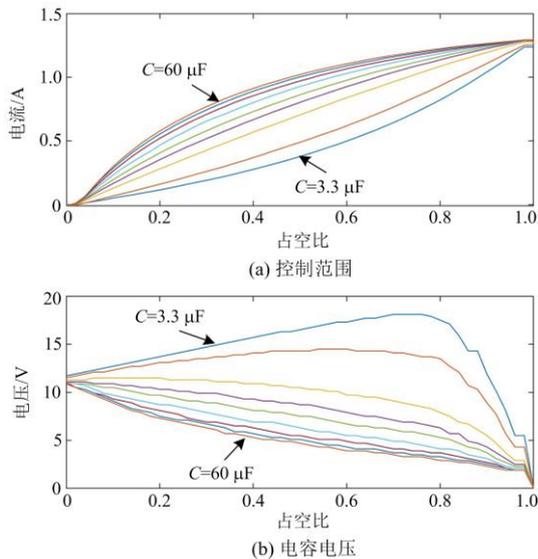


图 12 电容对潮流控制器运行特性的影响

Fig. 12 Effect of capacitor on operation characteristics of current flow controller

电压先增大后减小, 即电容最大时电压存在最大值, 且电阻越大电容最大, 电压的最大值越高, 潮流控制器的配置成本也越高。

电容对潮流控制器控制范围和电容最大电压的影响如图 12, 当有占空比限制时, 电容(3.3  $\mu\text{F}$ 、5  $\mu\text{F}$ 、10  $\mu\text{F}$ 、15  $\mu\text{F}$ 、20  $\mu\text{F}$ 、30  $\mu\text{F}$ 、40  $\mu\text{F}$ 、50  $\mu\text{F}$ 、60  $\mu\text{F}$ ) 越大, 电流的控制范围越小, 电容最大电压的最大值也越小。

综合考虑试验要求, 潮流控制器的电阻选择

1  $\Omega$ , 电容选择 30  $\mu\text{F}$ , 既保证了潮流控制器有较大的电流调节范围, 又降低了其配置成本。

#### 4.3 试验验证

为了验证潮流控制器的有效性, 进行了试验验证, 与仿真类似试验也分为 3 个阶段。

##### 1) $t < 1$ s

试验开始时, 电源开关  $T_p$ 、 $S_{ctr}$ 、 $S_{P1}$ — $S_{P3}$  导通, 潮流控制器仅为线路电流提供低损耗的通路, 线路电流仅受电路参数的影响, 各支路电流为:  $i_0 = 3.11$  A,  $i_{01} = 1.04$  A,  $i_{02} = 1.21$  A,  $i_{03} = 0.86$  A, 如图 13 所示。

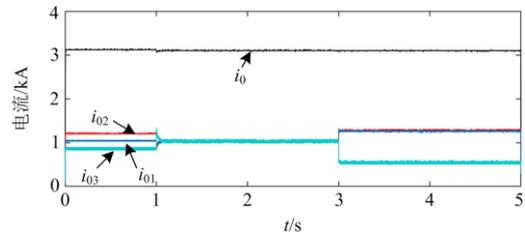


图 13 Line01—Line03 电流

Fig. 13 Current of Line01—Line03

##### 2) $1$ s $< t < 3$ s

1 s 时, 潮流控制器将 3 条线路电流控制在相同值。在控制系统的作用下电流迅速达到目标值, 如图 13 所示。图 14 中:  $v_{C1}$ — $v_{C3}$  为电容电压;  $i_{C1}$ — $i_{C3}$  为电容电流,  $v_{S1}$ — $v_{S3}$  为开关  $S_P$  的电压;  $i_{S1}$ — $i_{S3}$  为开关  $S_P$  的电流(这里选取 2 s 的试验波形, 此时试验已经稳定)。由于试验中的 IGBT 没有配置缓冲电路, 因此 IGBT 动作时会产生冲击电压, 如图 14(c)所示。开关  $S_P$  关断时, 线路电流通过二极管给电容充电(电阻被二极管短路), 电容电流为恒定的线路电流(图 14(b)), 电容电压线性上升(图 14(a))。开关  $S_P$  导通时, 电阻和  $S_P$  构成电容的放电回路, 电容电流反向且呈指数上升, 但电容电压呈指数下降。 $S_P$  两端电压为 0, 流过  $S_P$  的电流为线路电流与电容放电电流之和, 如图 14(d)所示。

##### 3) $3$ s $< t < 5$ s

3 s 时, 潮流控制器将线路 Line01 和 Line02 的电流控制到 1.28 A。如图 13 所示, 在控制系统的作用下, 电流迅速稳定在目标值。

## 5 对比分析

为了突出本文所提拓扑的优势, 在如图 4 所示的直流系统(取  $n = 3$ )中将所提拓扑与其他的直流潮流控制器进行了对比(方案一: 线间直流潮流控制器<sup>[18]</sup>; 方案二: 改进型线间直流潮流控制器<sup>[22]</sup>; 方案三: 电感共用式线间直流潮流控制器<sup>[23]</sup>; 方案四: 本文所提潮流控制器)。

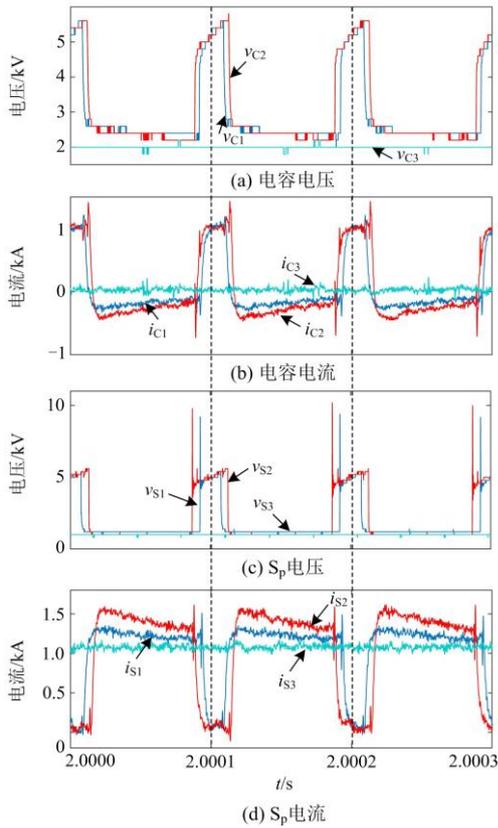


图 14 试验结果

Fig.14 Experiment result

5.1 配置成本

4种方案中潮流控制器的IGBT均能能承受电容最大电压。方案三和方案四中的二极管仅作为负荷通路无需承压，因此只满足电流要求即可。为了便于比较，方案三中的直流旁路开关由IGBT代替。假设电容的最大电压 $U_{rc} = 6.8\text{ kV}$ ，IGBT及二极管的额定电压分别为 $U_{igbt}$ 、 $U_d$ ，则各个方案的配置成本如表3所示。由于IGBT的成本为二极管的十几倍，因此本文所提拓扑的配置成本最低。

表 3 配置成本

Table 3 Configuration cost

方案	IGBT	二极管
一	$8U_{rc}/U_{igbt}$	0
二	$6U_{rc}/U_{igbt}$	0
三	$10U_{rc}/U_{igbt}$	0
四	$2U_{rc}/U_{igbt}$	$8+2U_{rc}/U_d$

5.2 控制范围

潮流控制器最重要的作用是控制线路的潮流，因此电流调节范围是衡量潮流控制器性能优劣最重要的指标。由于方案一至方案三的运行原理基本相同，均通过在线路中串入可调的等效电压源来控制

线路的电流，3种方案的潮流控制范围相同，因此仅分析线间直流潮流控制器(方案一)的电流控制范围。在控制系统的作用下线间直流潮流控制器等效电压源的变化范围为 $-0.5U_{rc} \leq U_{eq} \leq 0.5U_{rc}$ ，此时线路电流 $I_{01}$ 和 $I_{02}$ 的变化范围如图15所示。

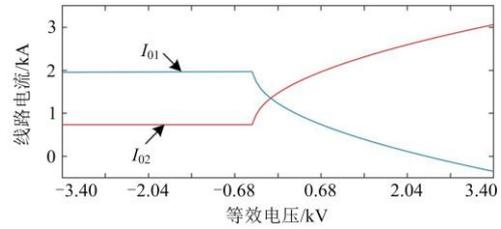


图 15 电流控制范围

Fig. 15 Control range of current

本文所提潮流控制器通过调节线路的等效电阻来控制线路的潮流。但为了降低潮流控制器的配置成本，潮流控制器的电容最大电压 $U_{Cmax} \leq U_{rc}$ ，为了满足上述要求，开关 $S_p$ 的占空比会有所限制，此时线路电流 $I_{01}$ 和 $I_{02}$ 的调节范围如图16和图17所示。

各个方案中电流的控制范围(可控制达到的电流最大值减最小值)如表4所示，相较于其他潮流控制器拓扑，本文所提拓扑将电流控制范围扩大了16.81%。

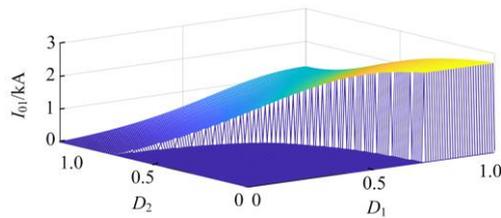


图 16 电流 I01 的调节范围

Fig. 16 Control range of current I01

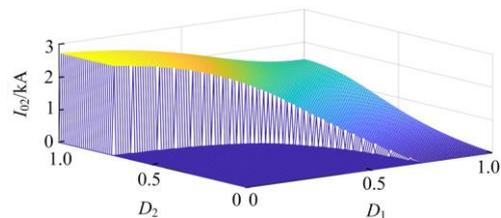


图 17 电流 I02 的调节范围

Fig. 17 Control range of current I02

表 4 控制范围

Table 4 Control range

方案	$I_{01}/\text{kA}$	$I_{02}/\text{kA}$	电流/kA
一	-0.35~1.97	0.74~3.06	2.32
二	-0.35~1.97	0.74~3.06	2.32
三	-0.35~1.97	0.74~3.06	2.32
四	0~2.71	0~2.71	2.71

### 5.3 功率损耗

除了配置成本和控制范围外, 4 种方案在功率损耗上也有所差异。系统的潮流无需控制时, 各方案中潮流控制器的损耗主要为开关的通态损耗。

$$P_{\text{loss}} = U_V I_L \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{loss}}$  为开关的通态损耗;  $U_V$  为开关的导通压降;  $I_L$  为线路电流。

假设系统正常运行时环境温度为 25 °C, 则 IGBT、反并联二极管及二极管的导通压降  $U_{v,\text{igbt}}$ 、 $U_{v,d}$ 、 $U_{v,D}$  分别为 1.95 V、1.40 V、1.31 V<sup>[24]</sup>。当系统潮流不受控时, 各个方案中潮流控制器的损耗分别为 36.18 kW、36.44 kW、18.09 kW、25.43 kW。

潮流控制功能投入时, 方案一和方案二的 IGBT 全部开始斩波, 因此两种方案的运行损耗均为 IGBT 的开关损耗。方案三的运行损耗包括 4 组 IGBT 及其串联的二极管的开关损耗。方案四的运行损耗为 IGBT 的开关损耗及电阻的能量损耗, 还有其他开关的导通损耗。

4 种方案的运行损耗如图 18 所示, 相较于其他方案, 当线路电流在自然运行点附近小范围调节时, 本文所提拓扑的运行损耗更小。

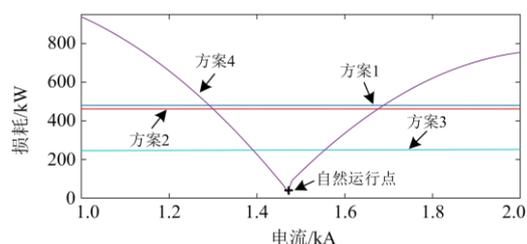


图 18 运行损耗

Fig. 18 Operation power loss

## 6 结论

针对多端柔性直流电网潮流无法灵活控制的问题, 本文提出了一种潮流控制器, 实现了多端直流电网潮流双向控制。本文提出的潮流控制器可以等效为受开关占空比控制的可变电阻, 通过多条线路的相互配合实现了潮流在线路间的合理分配。本文通过四端柔性直流电网模型和低压物理试验对其有效性进行了验证。最终, 得出以下结论:

1) 理论分析、仿真结果及试验数据表明本文所提拓扑适用于多端柔性直流电网的应用场景, 可以实现潮流的双向控制。

2) 本文设计的含电压限制环节和电流差增益环节的控制系統降低了潮流控制器的配置成本和运行损耗。此外, 通过试验合理选取元件参数, 增大了电流的控制范围。

3) 相较于其他直流潮流控制器, 本文所提拓扑采用模块化设计、配置成本低, 潮流控制范围大, 且小范围调节电流时功率损耗小。

### 参考文献

- [1] 王思华, 赵磊, 王军军, 等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 9-17.
- [2] WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 9-17.
- [3] RAHBAR K, CHAI C C, ZHANG Rui. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1482-1493.
- [4] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
- [5] JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [6] 黎卫国, 杨旭, 张长虹, 等. 多端直流输电工程直流高速开关直流燃弧特性试验分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 17-22.
- [7] LI Weiguo, YANG Xu, ZHANG Changhong, et al. Analysis on DC arcing characteristics test of DC high speed switch in multi-terminal HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 17-22.
- [8] 张钦智, 王宾, 李琰, 等. 风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 131-138.
- [9] ZHANG Qinzhi, WANG Bin, LI Yan, et al. Research on fault crossing coordination control of a wind farm via flexible direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 131-138.
- [10] HUANG Wujing, ZHANG Ning, YANG Jingwei, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1452-1464.
- [11] 傅春翔, 汪天呈, 鄢洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
- [12] FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [13] 赵逸, 黄文焘, 邵能灵, 等. 考虑多维应用场景的 MMC-MTDC 系统拓扑选择和参数配置[J]. 电力系统

- 自动化, 2020, 44(24): 96-104.
- ZHAO Yi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Topology selection and parameter configuration of MMC-MTDC system considering multi-dimension application scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 96-104.
- [9] 刘栋, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于面积等效法的模块化多电平换流器损耗分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 197-201.
- LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Loss evaluation for modular multilevel converter based on equivalent-area modulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 197-201.
- [10] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
- ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [11] HAILESELAASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [12] KONTOS E, PINTO R T, BAUER P. Effect of power flow control methods on the DC fault response of multi-terminal DC networks[C] // IECON 2014 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2014, Dallas, USA: 2075-2081.
- [13] 杨越, 何健, 杜宁, 等. 直流电网潮流控制方法述评[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 176-182.
- YANG Yue, HE Jian, DU Ning, et al. Review of power flow control in DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 176-182.
- [14] 李国庆, 边竞, 王鹤, 等. 适用于直流电网的环流式线间直流潮流控制器[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1118-1127.
- LI Guoqing, BIAN Jing, WANG He, et al. A circulating current interline DC power flow controller for DC grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1118-1127.
- [15] DENG Na, WANG Puyu, ZHANG Xiaoping, et al. A DC current flow controller for meshed modular multilevel converter multiterminal HVDC grids[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 43-51.
- [16] MU Qing, LIANG Jun, LI Yalou, et al. Power flow control devices in DC grids[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-7.
- [17] KISH G J, LEHN W L. A modular bidirectional DC power flow controller with fault blocking capability for DC networks[C] // 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, June 23-26, 2013, Salt Lake City, USA: 1-7.
- [18] SAU-BASSOLS J, PRIETO-ARAUJO E, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Modelling and control of an interline current flow controller for meshed HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 11-22.
- [19] SAU-BASSOLS J, FERRER-SAN-JOSE R, PRIETO-ARAUJO E, et al. Multiport interline current flow controller for meshed HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5467-5478.
- [20] 廖知卓. 基于模块化多电平结构的无源直流潮流控制器[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- LIAO Zhizhuo. Modular-multilevel-converter based passive DC power flow controller (MMC-PDPFC)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [21] 田培涛, 吴庆范, 黄金海, 等. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流系统线路保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 170-177.
- TIAN Peitao, WU Qingfan, HUANG Jinhai, et al. Research on protection strategy of a hybrid multi-terminal DC system based on LCC and FHMMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 170-177.
- [22] 杨越, 张文亮, 汤广福, 等. 双 H 桥型直流电网潮流控制器的控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2505-2510.
- YANG Yue, ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, et al. Control strategy of dual H-bridge power flow controller for DC grids[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2505-2510.
- [23] 张家奎, 徐千鸣, 罗安, 等. 电感共用式线间直流潮流控制器及其控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 20-26.
- ZHANG Jiakui, XU Qianming, LUO An, et al. Inductor sharing interline DC power flow controller and its control method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 20-26.
- [24] ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. Combined hybrid DC circuit breaker capable of controlling current flow[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 11157-11167.

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-03-15

作者简介:

张成泉(1996—), 男, 硕士, 研究方向为直流电网保护与控制; E-mail: 3227515528@qq.com

邹贵彬(1971—), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: guibinzou@sdu.edu.cn

(编辑 姜新丽)