

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.019

适用于多并行线路功率平衡的电磁式潮流控制方法

杨 鹏¹, 李铁成², 苏 灿², 王向东², 孙广辉¹, 郭 燕³

(1. 国网河北省电力有限公司, 石家庄 050000; 2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021;
3. 华北电力大学河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 随着电网互联互通进程推进,各区域电网之间依靠联络线连接成一个整体,其中,多并行线路在运行过程中可能出现潮流分布不平衡现象,这一点可能威胁电力系统的安全稳定运行。针对该问题,提出了一种由电压移相器和电压调节器串联组成的电磁式潮流控制器的拓扑结构,分析其潮流调控机理,并提出一种应用于多并行线路功率平衡调节的电磁式潮流控制器控制策略。通过坐标转化将三相电力系统电路方程转化在 dq 坐标下,实现对调节线路的有功、无功独立控制。双线路并联仿真结果表明,所提控制策略能够良好的应用于电磁式潮流控制器,针对负荷变动的电力系统具有良好的调节效果,调节误差小,采用电磁式潮流控制器具有很高的经济性和耐用性。

关键词: 多并行线路; 电磁式潮流控制器; 潮流平衡; 解耦控制

Electromagnetic Power Flow Control Method for Power Balance of Multiple Parallel Lines

YANG Peng¹, LI Tiecheng², SU Can², WANG Xiangdong², SUN Guanghui¹, GUO Yan³

(1. State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 3. Hebei Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: With the advancement of the interconnection process of power grid, the regional power grids are connected as a whole by tie lines, in which, the unbalance of power flow distribution during the operation of the multiple parallel lines may be occurred and the safe and stable operation of the power system may be threatened. In view of this issue, a topological structure of electromagnetic power flow controller composed of voltage phase shifter and voltage regulator in series is proposed. The power flow regulation mechanism is analyzed, and an electromagnetic power flow controller control strategy for power balance regulation of multiple parallel lines is proposed. The three-phase power system circuit equation is transformed into dq coordinates through coordinate transformation to achieve independent control of active and reactive power of the regulating circuit. The simulation results of the two-line in parallel show that the proposed control strategy can be well applied to the electromagnetic power flow controller. It has a good regulation effect for the power system with load fluctuation and small regulation error. The adoption of electromagnetic power flow controller has a high economical efficiency and durability.

Key words: multiple parallel lines; electromagnetic power flow controller; power flow balance; decoupling control

收稿日期:2024-08-10; 修回日期:2024-10-11

基金项目:国网河北省科技项目(雄安城市配电网电压和潮流数字化精准调控技术研究与应用)。

Project Supported by State Grid Hebei Provincial Science and Technology Project(Research and Application of Digital Accurate Control Technology of Voltage and Power Flow in Xiong'an City Distribution Network).

0 引言

近年来,随着社会经济的发展,为响应国家提出的可持续发展战略,大量新能源电力接入电网,电网发电类型逐渐多元化^[1-3]。由于大部分新能源如风电、光伏出力都具有不稳定性^[4-6],为了提高电网的供电可靠性,电网规模不断扩大,电网中各节点之间互联互通,但这也使整个系统的潮流调控问题变得更加复杂,尤其是对重要联络线实施潮流控制^[7-10]是当前电网所面临的重要问题之一。

随着电网规模不断扩大,多并行线路上的潮流分配问题有待于进一步优化^[11]。这不仅有利于提高电力系统的经济性,对电力系统的运行可靠性也有重要意义^[12-14]。多并行线路潮流在自然分布下取决于各线路的阻抗参数,而在实际输电系统中,多并行线路有可能选取不同型号、不同长度的输电导线,各线路的阻抗参数存在一定差异,或者同型号、同长度的新旧线路阻抗参数由于老化问题也可能不一致,若不施加调控手段,极有可能出现潮流分配不均的情况^[15-18],即某些线路出现重载甚至过载现象,而其余线路仍处于轻载或未充分利用。此时系统对于重载线路上的设备和保护装置要求比较高,而轻载线路上的设备和保护装置远未达到承载能力。对于重载线路,设备老化速度加快,使用寿命缩短。线路某处一旦发生故障,若保护装置不能及时隔离、清除故障,恢复该线路的供电能力,极有可能引发潮流转移^[19-22],导致其他线路重载,甚至过载引起保护动作,从而引发一系列连锁故障^[23],最严重的情况是受电端失去全部外部供电,内部系统因功率不足而崩溃,这也是澳大利亚南澳洲大停电^[24-25]的原因之一。因此,潮流分配不均给电网稳定运行埋下了安全隐患,在多并行线路上加装潮流控制装置来平衡各线路功率,可以有效解决这一安全隐患,保证系统的安全稳定运行^[26-29]。

电力系统中常用基于电力电子器件的统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[30-32],该装置由两个变换器背对背构成,具有调节方式灵活、调节精度较高的优势,但由于主要采用电力电子器件,统一潮流控制器的成本较高,应用于高电压系统中,电力电子器件的耐压问题也有待突破。文中在调节线路潮流时采用电磁式潮流控制器,该装置由电压移相器和电压调节器组成,具有耐受性好、可靠性高、成本较低的优势。虽然调节精度不及统一潮流控制器,但只要加上合适的控制策略,就可以实现平衡多并行线路潮流的目的。

目前,很多学者针对潮流控制器的控制策略研究取得了一定成果。文[33]提出了一种交叉耦合的控制方法对统一潮流控制器串联侧变换器进行控制,鲁棒性较好,有很好的动态响应特性,但控制方式涉及到两个变换器的等效,控制策略较为复杂。文[34-35]提出了一种基于 MMC 拓扑的统一潮流控制器控制策略,该策略能够实现有功无功独立调节,响应较快,但 MMC 拓扑结构涉及到大量子模块的串并联,电力电子器件数量较大,实际运行成本较高。文[36-37]提出了一种模糊自整定 PI 控制方法,实现静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)对线路潮流的调节,在动态过程中,利用模糊逻辑对 PI 控制器的参数进行实时调节,该控制策略具有很好的动态调节特性,调节速度较快,抑制震荡的效果较好,但依旧存在逆变器等效,控制方式较为复杂。

针对以上问题,文中拟提出一种适用于多并行线路功率平衡调节的电磁式潮流控制器控制方法。首先对电磁式潮流控制器的拓扑结构和工作原理进行研究,再结合多并行线路实际运行系统研究相关控制策略,并通过仿真验证所提适用于多并行线路功率平衡调节的控制策略。

1 电磁式潮流控制器拓扑结构

单相电磁式潮流控制器的拓扑结构见图 1。以 A 相为例,单相电磁式潮流控制器由单相电压移相器 1 和单相电压调节器 2 串联组成。

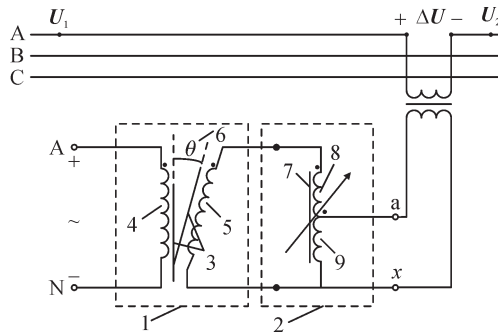


图1 电磁式潮流控制器拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure diagram of electromagnetic power flow controller

图1中电压移相器1包括闭合铁心磁路3、一次绕组4以及二次绕组5和相位调节装置6。将一次绕组通过连接器并接在火线A和零线N上,电压和功率经闭合铁心磁路实现从一次绕组到二次绕组的双向变换,并通过相位调节装置,可以实现连续调节二次侧电压相位的目的。电压调节器2由一个二次有载分接开关调压变压器或自耦调压变压器

构成,包括闭合铁心磁路7、一次绕组8和二次绕组9。将经过单相电压移相器得到的幅值固定,相位可调的电压接入单相电压调节器,通过二次有载分接开关调压变压器或自耦调压变压器的调节,可以实现按档位调节电压调节器2的二次侧电压幅值的目的。

综上所述,将电压移相器与电压调节器串联得到的电磁式潮流控制器可以实现输出一个电压幅值和相位均可调的电压相量,将该相量串联接入待调节线路,加上合适的控制策略,即可实现对该线路上潮流的调节与控制。文中使用的三相电磁式潮流控制器是由3个单相电磁式潮流控制器并联连接构成三相电磁式潮流控制器组,分别接入abc三相线路中,实现对三相输电线路上传输的有功功率和无功功率的调节与控制。

2 电磁式潮流控制器工作原理

电磁式潮流控制器的工作原理见图2。图2中: U_1 为潮流控制器的首端电压; U_2 为潮流控制器的末端电压; ΔU 为电磁式潮流控制器提供的串联电压相量; R 、 X 为电磁式潮流控制器的内阻抗; $P+jQ$ 为潮流控制器所控线路上传输的有功功率和无功功率。由图2可得电磁式潮流控制器的工作原理矢量图,见图3。图3中: U_R 、 U_L 分别为电磁式潮流控制器内电阻和内电抗上的电压降; ΔU 、 θ 分别为电磁式潮流控制器提供的串联电压相量幅值和相位。

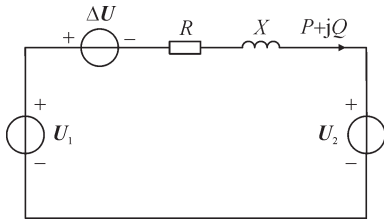


图2 电磁式潮流控制器的工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of electromagnetic power flow controller

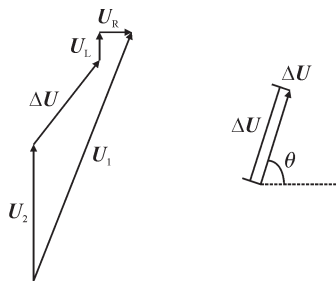


图3 电磁式潮流控制器的工作原理矢量图

Fig. 3 The working principle of electromagnetic power flow controller vector diagram

根据图2可得abc三相坐标系下的电路方程为

$$\begin{cases} U_{1a} = \Delta U_a + Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + U_{2a} \\ U_{1b} = \Delta U_b + Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + U_{2b} \\ U_{1c} = \Delta U_c + Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + U_{2c} \end{cases} \quad (1)$$

将abc三相坐标系下的电路方程转化到dq坐标系下为

$$L \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{1d} - U_{2d} - \Delta U_d \\ U_{1q} - U_{2q} - \Delta U_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

当系统处于稳态时,由式(2)可得

$$\begin{cases} \omega Li_q - Ri_d = -U_{1d} + U_{2d} + \Delta U_d \\ -\omega Li_d - Ri_q = -U_{1q} + U_{2q} + \Delta U_q \end{cases} \quad (3)$$

线路上的有功和无功功率可表示为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1d} & U_{1q} \\ U_{1q} & -U_{1d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 U_1 与d轴重合,可得 $U_{1q}=0$,有

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{1d} & 0 \\ 0 & -U_{1d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

实际电磁式潮流控制器的内阻抗满足 $\omega L \gg R$,可忽略 R 的作用,得到稳态时的电流为

$$\begin{cases} i_d = \frac{1}{\omega L} (-\Delta U_q - U_{2q}) \\ i_q = \frac{1}{\omega L} (-\Delta U_{1d} + U_{2d} + \Delta U_d) \end{cases} \quad (6)$$

因此,输送的有功和无功功率加入修正系数后可表示为

$$\begin{cases} P = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1d}}{\omega L} (U_{2q} + \Delta U_q) \\ Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1d}}{\omega L} (U_{1d} - U_{2d} - \Delta U_d) \end{cases} \quad (7)$$

电磁式潮流控制器提供的串联电压相量可表示为

$$\begin{cases} \Delta U_d = U_{1d} - U_{2d} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{1d}} \cdot Q \\ \Delta U_q = -U_{1q} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{1d}} \cdot P \end{cases} \quad (8)$$

电磁式潮流控制器提供的理想串联电压向量可表示为

$$\begin{cases} \Delta U = \sqrt{\Delta U_d^2 + \Delta U_q^2} \\ \theta = -\arctan(\frac{\Delta U_q}{\Delta U_d}) \end{cases} \quad (9)$$

若 $\Delta U' - \delta U \leq \Delta U \leq \Delta U' + \delta U$,则可令 $\Delta U = \Delta U'$,其中 $\Delta U'$ 为与 ΔU 最接近的某一电压档位,

δU 为电压档位步距。

由式(7)可知,在忽略电阻 R 的作用并且系统处于稳态时,线路上传输的有功功率 P 只与 ΔU_q 有关,无功功率 Q 只与 ΔU_d 有关。因此,通过调节电磁式潮流控制器提供的串联电压相量就可以实现线路上传输的有功和无功功率的独立解耦调节,从理论上应证了电磁式潮流控制器的可行性。应用的电磁式潮流控制器能够实现电压幅值的档位调节和电压相位的连续调节,选择适当的电压分接头是保证精准调控潮流的必要前提。

3 电磁式潮流控制器控制策略

文中提出了用于多并行线路的电磁式潮流控制器的控制策略。在实际电力系统中,若 n 条线路同时为一条输电线路(或一个区域)供电,可采用“ $n-1$ ”控制策略,在 $n-1$ 条送电线路路上安装电磁式潮流控制器,通过调节 $n-1$ 条线路上的有功和无功功率,以实现 n 条线路的潮流平衡。

3.1 等效电路图及电路方程

电磁式潮流控制器典型应用场景见图4。为平衡 n 条送电线路上的潮流,根据“ $n-1$ ”控制策略,在其中 $n-1$ 条送电线路路上安装电磁式潮流控制器。

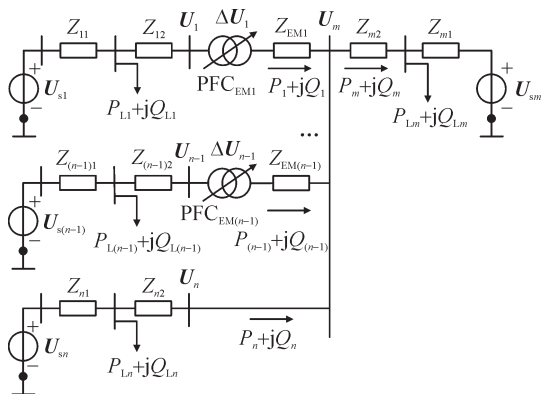


图4 电磁式潮流控制器应用场景图

Fig. 4 Application scenario diagram of electromagnetic power flow controller

该应用场景的等效电路图见图5。图5中 $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}$ 为各线路电磁式潮流控制器的首端电压; U_m 为 n 条线路并联处的电压; R 和 X 为电磁式潮流控制器的内阻抗; $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_{n-1}$ 为各线路电磁式潮流控制器提供的串联电压相量。 $P_1+jQ_1, P_2+jQ_2, \dots, P_{n-1}+jQ_{n-1}$ 为各调节线路上的有功功率和无功功率。

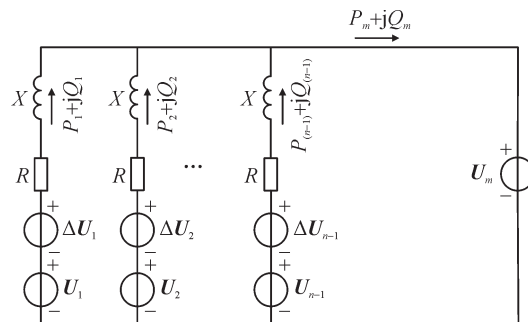


图5 电磁式潮流控制器等效电路图

Fig. 5 Electromagnetic power flow controller equivalent circuit diagram

由图(5)可得电路方程为:

$$\begin{cases} U_{1a} = \Delta U_{1a} + Ri_{1a} + L \frac{di_{1a}}{dt} + U_{ma} \\ U_{1b} = \Delta U_{1b} + Ri_{1b} + L \frac{di_{1b}}{dt} + U_{mb} \\ U_{1c} = \Delta U_{1c} + Ri_{1c} + L \frac{di_{1c}}{dt} + U_{mc} \\ \vdots \\ U_{(n-1)a} = \Delta U_{(n-1)a} + Ri_{(n-1)a} + L \frac{di_{(n-1)a}}{dt} + U_{ma} \\ U_{(n-1)b} = \Delta U_{(n-1)b} + Ri_{(n-1)b} + L \frac{di_{(n-1)b}}{dt} + U_{mb} \\ U_{(n-1)c} = \Delta U_{(n-1)c} + Ri_{(n-1)c} + L \frac{di_{(n-1)c}}{dt} + U_{mc} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 有功功率与无功功率解耦控制

由式(5)可得:

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1d}}{\omega L} (U_{mq} + \Delta U_{1q}) \\ Q_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1d}}{\omega L} (U_{1d} - U_{md} - \Delta U_{1d}) \\ P_2 = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{2d}}{\omega L} (U_{mq} + \Delta U_{2q}) \\ Q_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{2d}}{\omega L} (U_{2d} - U_{md} - \Delta U_{2d}) \\ \vdots \\ P_{(n-1)} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_{(n-1)d}}{\omega L} (U_{mq} + \Delta U_{(n-1)q}) \\ Q_{(n-1)} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{(n-1)d}}{\omega L} (U_{(n-1)d} - U_{md} - \Delta U_{(n-1)d}) \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,在忽略电阻 R 的作用并且系统处于稳态时,线路上传输的有功功率 P 只与本线路串联电压相量 ΔU_q 有关,无功功率 Q 只与本线路串

联电压相量 ΔU_d 有关。因此,通过调节各线路电磁式潮流控制器提供的串联附加电压相量就可以实现调节各线路上传输的有功和无功功率。

$$\begin{cases} \Delta U_{1d} = U_{1d} - U_{md} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{1d}} \cdot Q_1 \\ \Delta U_{1q} = -U_{mq} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{1d}} \cdot P_1 \\ \Delta U_{2d} = U_{2d} - U_{md} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{2d}} \cdot Q_2 \\ \Delta U_{2q} = -U_{mq} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{2d}} \cdot P_2 \\ \vdots \\ \Delta U_{(n-1)d} = U_{(n-1)d} - U_{md} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{(n-1)d}} \cdot Q_{(n-1)} \\ \Delta U_{(n-1)q} = -U_{mq} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega L}{U_{(n-1)d}} \cdot P_{(n-1)} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, $P_1+jQ_1, P_2+jQ_2, \dots, P_{(n-1)}+jQ_{(n-1)}$ 可根据 P_m+jQ_m 按 $n-1$ 条送电线路的额定传输容量分配计算得到,这样在满足线路 m 供电需求的同时,可以实现 n 条送电线路上的潮流平衡,不至于出现某线路重载,某线路轻载的问题。

3.3 控制策略图

文中提出的适用于多并行线路功率平衡调节的电磁式潮流控制器的控制策略见图6。

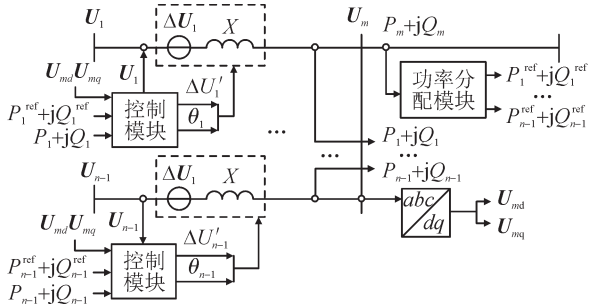


图6 多并行线路潮流平衡调节控制策略图

Fig. 6 Multi-parallel line power flow balance adjustment control strategy diagram

图6中,测量线路 m 上的潮流,得到 P_m+jQ_m ,在功率分配模块中按各线路额定传输容量进行分配,得到各线路有功和无功功率参考值 $P_1^{\text{ref}}+jQ_1^{\text{ref}}, \dots, P_{n-1}^{\text{ref}}+jQ_{n-1}^{\text{ref}}$,将这一参考值输入到各线路电磁式潮流控制器的控制模块中,测量各潮流控制器的首端电压,得到 $U_1, \dots, U_{n-1}$,将这些测量值输入坐标转化模块,得到 dq 坐标系下 $J_{1d}, J_{1q}, \dots, U_{(n-1)d}, U_{(n-1)q}$,分别输入到各线路潮流控制器的控制模块中,测量潮流控制器的末端电压得到 U_m ,将该值输入坐标转化模块,得到 dq 坐标系下 U_{md} 和 U_{mq} ,输入到各线路潮流控制器的控制模块中。实时测量各线路上的潮流得到 $P_1+jQ_1, \dots, P_{(n-1)}+jQ_{(n-1)}$,作为形成闭环调节的反馈量输入到潮流控制器的控制模块中。经过这些量的

共同作用,潮流控制器的控制模块输出各线路上的串联电压幅值 $\Delta U'_1, \dots, \Delta U'_{(n-1)}$ 和相位 $\theta_1, \dots, \theta_{(n-1)}$,合成各线路上潮流控制器提供的串联电压相量,使得各线路上潮流接近参考潮流,实现多并行线路潮流平衡调节。

单个电磁式潮流控制器的控制策略见图7。图7中 P_i^{ref} 和 Q_i^{ref} 为各线路按额定传输容量进行分配得到的参考有功和无功功率, P_i 和 Q_i 为各线路上的实时功率反馈量。 U_{id} 为电磁式潮流控制器的首端电压的 d 轴分量, $i=1,2,3, \dots, n-1$ 。 U_{md} 、 U_{mq} 为潮流控制器末端电压的 dq 轴分量。

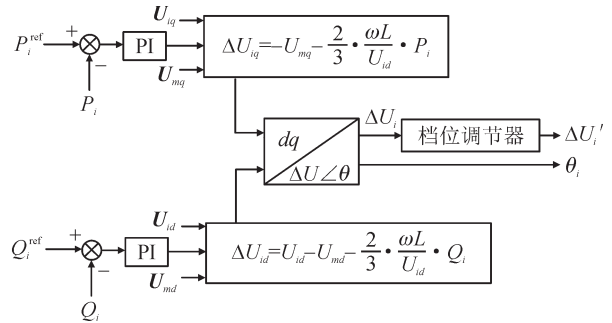


图7 单个电磁式潮流控制器控制策略图

Fig. 7 Control strategy diagram of a single electromagnetic power flow controller

4 仿真实验

4.1 电磁式潮流控制器单机验证

为了验证文中所提控制策略的有效性,首先对电磁式潮流控制器进行单机验证。给定有功功率参考值和无功功率参考值均为1 MW,仿真结果见表1。

表1 电磁式潮流控制器单机仿真结果

Table 1 Single machine simulation results of electromagnetic power flow controller

参数	参考值	实际值	误差/%
有功功率/MW	1	0.988	1.20
无功功率/Mvar	1	1.010	1.00

待调节线路上有功功率和无功功率的调节过程分别见图8、9。图8、9中:给定有功功率参考值 P^{ref} 为1 MW;无功功率参考值 Q^{ref} 为1 Mvar; P 和 Q 分别为潮流控制器所在线路上的实际有功和无功功率。从图8、9可以看出,有功功率和无功功率在0.2 s之内达到稳态,响应速度较快,并且稳态值与参考值接近,由于电磁式潮流控制器电压幅值采取档位调节,本身存在固有误差,其中有功功率误差为1.20%,无功功率误差为1.00%。另外,为改善电磁式潮流控制器在系统达到稳态时档位来回切换的问题,控制策略中设定允许有功功率误差为0.05 MW,

无功功率误差为0.01 MW,即有功和无功的实时反馈量与给定参考量小于等于允许误差时,电磁式潮流控制器不参与潮流调控。因此该误差在可接受范围内。

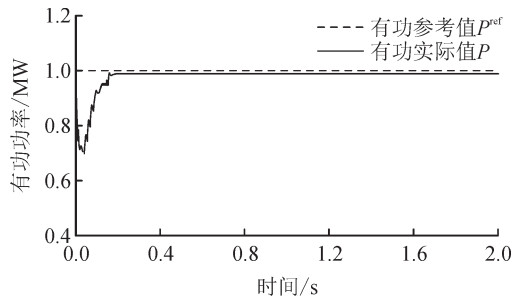


图8 有功功率调节过程

Fig. 8 Active power adjustment process

4.2 多并行线路仿真模型

为了验证该控制策略应用在实际多并行线路系统中的有效性,建立两条并行线路系统仿真模型,见图10。仿真中采用“n-1”控制策略,在其中一条并行线路上安装电磁式潮流控制器PFC_{EM1}。仿真参数见表2。

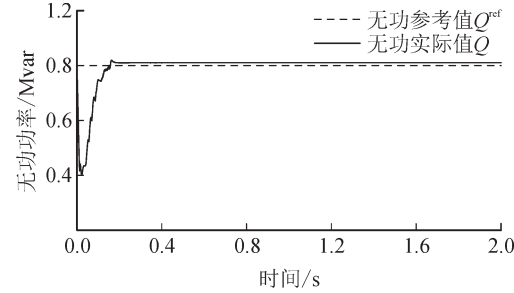


图9 无功功率调节过程

Fig. 9 Reactive power adjustment process

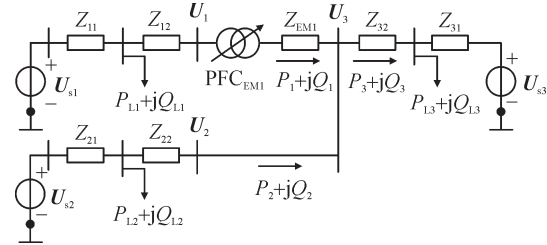


图10 两条线路并联输电场景图

Fig. 10 Parallel transmission scenario diagram of two lines
为验证文中提出的控制策略在不同工况下的潮流控制能力,仿真设定了3种不同工况。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
发电机电压/kV	10.500 00	线路1-1长度/km	5
线路1单位阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.13+j0.001 15	线路1-2长度/km	2
线路2单位阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.50+j0.001 60	线路2-1长度/km	4
线路3单位阻抗 1/(Ω·km ⁻¹)	0.13+j0.001 15	线路2-2长度/km	3
线路3单位阻抗 2/(Ω·km ⁻¹)	0.50+j0.001 60	线路1 负荷/MW	4+j4
线路3-1长度/km	3	线路2 负荷/MW	5+j1
线路3-2长度/km	2	线路3 负荷/MW	10+j5
潮流控制器内阻/Ω	1×10 ⁻⁶	潮流控制器内抗/Ω	1×10 ⁻³

工况1。未加入电磁式潮流控制器,多并行线路潮流自然分配。

工况2。在工况1的基础上,加入电磁式潮流控制器,两条并行线路潮流按一比一进行分配。 $t=1\text{ s}$ 时, P_3+jQ_3 加倍。

工况3。在工况1的基础上,加入电磁式潮流控制器,两条并行线路潮流按2:1进行分配。线路3上负荷按比例增加。

4.2.1 多并行线路潮流自然分配

在工况1条件下,两条并行线路均未安装电磁式潮流控制器,两条并行线路潮流自然分配,无任何调节措施。仿真结果见表3。

根据仿真结果可知,在系统潮流自然分配,不添加任何潮流调控措施时,线路1、2上潮流分配极不

表3 工况1仿真结果

Table 3 Simulation result of working condition one

线路	有功功率/MW	无功功率/Mvar
1	1.185	0.411
2	-0.005	0.165
3	1.180	0.576

均衡,线路3上的有功和无功绝大多数由线路1提供。由于未接入电磁式潮流控制器,串联电压相量幅值和相位均为0。

4.2.2 多并行线路潮流1:1分配

在工况2条件下,线路1上安装电磁式潮流控制器。假设线路1、2的额定传输容量相同,电磁式潮流控制器的控制策略按照两条线路潮流1:1分配设定。

由于电磁式潮流控制器提供的串联电压幅值采取档位调节,调节步距在仿真中设定为50 V。调节范围为0~1 000 V。为改善电磁式潮流控制器在系统达到稳态时档位来回切换的问题,控制策略中设定允许有功功率误差为0.05 MW,无功功率误差为0.01 MW,即有功和无功的实时反馈量与给定参考量小于等于允许误差时,电磁式潮流控制器不参与潮流调控。仿真结果见表4、5。

表4 工况2负荷变动前仿真结果

Table 4 Simulation result before load change in working condition 2

线路	有功功率/MW	无功功率/Mvar
线路1	0.320	0.215
线路2	0.327	0.195
线路3	0.647	0.410

表5 工况2负荷变动后仿真结果

Table 5 Simulation results after load changes in working condition 2

线路	有功功率/MW	无功功率/Mvar
线路1	0.850	0.725
线路2	0.855	0.745
线路3	1.705	1.471

线路1、2有功功率和无功功率对比见图11、12。图11、12中: P_1 和 Q_1 为送电线路1上有功和无功功率; P_2 和 Q_2 为送电线路2上有功和无功功率; P_3 和 Q_3 为受电线路3上有功和无功功率。由图11、12可知,在加入电磁式潮流控制器后,线路1、2的潮流不均情况得到改善,在系统达到稳态时,线路1、2的潮流相近,近似满足1:1,说明所提出的控制策略是有效的。由于电磁式潮流控制器电压幅值采取档位调节和仿真中设定的允许功率误差,所以线路1、2的潮流并不完全相同,调节误差在可接受范围内。1 s时,线路3上负荷增加50%,线路1、2上的潮流经过电磁式潮流控制器的调节,重新实现潮流分配,也说明所提出的控制策略具有良好的动态调节性能。

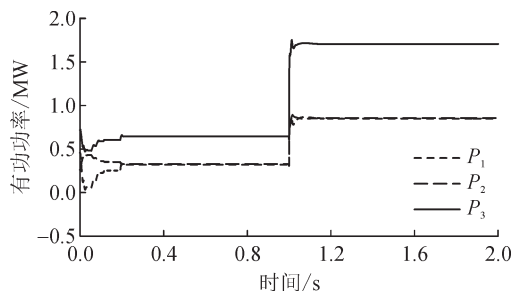


图11 线路1、2有功功率对比图

Fig. 11 Comparison chart of active power of line 1, 2

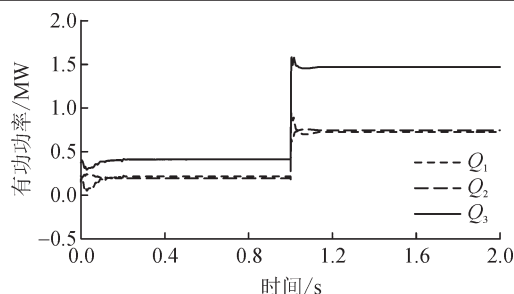


图12 线路1、2无功功率对比图

Fig. 12 Comparison chart of reactive power of line 1, 2

4.2.3 多并行线路潮流2:1分配

在工况3条件下,线路1上安装电磁式潮流控制器,假设线路1、2的额定传输容量比为2:1,线路3初始负荷为10+j5 MW,电磁式潮流控制器的控制策略按照两条线路潮流2:1分配设定。线路3上的负荷按比例增加,仿真结果见表6、7。

表6 有功功率及误差

Table 6 Active power and error

增加负荷/%	P_1 /MW	P_2 /MW	P_1 理想值/MW	P_1 误差/%
0	0.499 5	0.254 5	0.502 7	0.64
10	0.702 8	0.336 6	0.692 7	1.46
20	0.803 7	0.451 0	0.836 7	3.94
30	1.092 0	0.487 6	1.052 7	3.735
40	1.182 0	0.593 7	1.183 3	0.13
50	1.281 0	0.690 9	1.314 7	3.37
60	1.444 0	0.757 6	1.468 0	2.40
70	1.615 0	0.816 3	1.620 7	0.57
80	1.784 0	0.870 2	1.769 3	1.47
90	1.943 0	0.923 8	1.910 7	3.23
100	1.935 0	1.035 0	1.980 0	4.50

表7 无功功率及误差

Table 7 Reactive power and error

增加负荷/%	Q_1 /MW	Q_2 /MW	Q_1 理想值/MW	Q_1 误差/%
0	0.381 5	0.142 6	0.349 4	9.19
10	0.568 2	0.238 2	0.537 5	5.17
20	0.741 1	0.329 0	0.713 3	3.90
30	0.956 9	0.410 2	0.911 3	5.00
40	1.121 0	0.495 0	1.077 3	4.05
50	1.173 0	0.615 3	1.192 7	1.65
60	1.452 0	0.656 8	1.405 3	3.32
70	1.595 0	0.741 8	1.558 0	2.37
80	1.731 0	0.826 3	1.704 7	1.54
90	1.908 0	0.892 7	1.867 3	2.18
100	1.983 0	0.978 9	1.974 0	0.46

根据仿真结果可知,线路3上负荷按比例增加,线路1、2的有功功率和无功功率近似满足2:1。当线路负荷增加较小时,由于档位调节和允许功率误

差的原因,调节误差可能略大,但随着线路3负荷变大,调节误差相对稳定在较小值。基本可以维持在5%以内,说明文中提出的基于电磁式潮流控制器的控制策略效果较好。

5 结论

文中针对多并行线路潮流平衡问题进行了研究,首先提出了一种电磁式潮流控制器的拓扑结构,根据其结构从理论上分析其工作原理,并针对电磁式潮流控制器应用于多并行线路提出了一种有功、无功解耦的控制策略,最后搭建了电磁式潮流控制器应用于双并行线路的典型应用场景,对文中所提的拓扑结构和控制策略进行了仿真验证,得到以下结论:

1)电磁式潮流控制器由电压移相器和电压调节器构成,电压移相器可以连续调节输入电压的相位,电压调节器可以按档位调节输入电压的幅值,因此电磁式潮流控制器可以提供一个幅值按档位调节、相位可连续调节的电压相量串入待调节线路,实现调节潮流的目的。

2)文中提出了一种适用于多并行线路潮流平衡调节的电磁式潮流控制器的功率解耦控制方法,基于 $abc-dq$ 坐标转换理论得到潮流控制器所控线路的有功功率只与串联电压分量的 q 轴分量有关,无功功率只与串联电压分量的 d 轴分量有关,现对所控线路潮流解耦调节的目的。

3)仿真结果表明,该控制策略能够很好的适应潮流变化,当负荷变动时,也能够满足潮流平衡的需求。另外,电磁式潮流控制器的经济性,耐用性远优于基于电力电子器件的统一潮流控制器,调节误差在可接受范围内,有良好的调节效果,符合实际电力系统对经济性和可靠性的追求。

文中提出的控制策略主要应用于电磁式潮流控制器,由于电磁式潮流控制器电压幅值采取档位调节,为避免出现稳态时电压档位频繁切换而引入了允许功率误差,这增大了电磁式潮流控制器的调节误差,如何克服电压档位的频繁切换问题和进一步减小调节误差也是后续工作中值得研究的问题。

参考文献:

- [1] 刘沅昆,张维静,张艳,等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [2] 李建林,田立亭,来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.
LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25.
- [3] 陈景文,周媛,李晓飞,等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20.
- [4] 王蒙,李庆海,葛景,等. 提升新能源送出能力的多类型无功补偿装置优选[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 8-13.
WANG Meng, LI Qinghai, GE Jing, et al. Optimal selection of multiple types of reactive power compensation devices enhancing new energy delivery capacity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 8-13.
- [5] 梁琛,王维洲,马喜平,等. 基于随机潮流的高比例新能源接入配电网的极限线损分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 34-40.
LIANG Chen, WANG Weizhou, MA Xiping, et al. Analysis on limit line loss in high proportion of renewable energy distribution network based on stochastic power flow[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 34-40.
- [6] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [7] 张辰琪,朱成昊,李洋,等. 基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 212-218.
ZHANG Chenqi, ZHU Chenghao, LI Yang, et al. Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 212-218.
- [8] 刘家军,王锟,谭雅岚,等. 一种电网解列、并列与联络线潮流综合控制方法[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 100-106.
LIU Jiajun, WANG Kun, TAN Yalan, et al. An integrated control method of splitting, paralleling and tie-line power flow[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 100-106.
- [9] 高扬,艾芊. 基于多智能体系统的微电网联络线潮流精确控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 140-146.
GAO Yang, AI Qian. Precise control of tie-line power for microgrid based on multi-agent system[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2018, 42(5): 140-146.
- [10] CALOVIC M S. Advanced automatic generation control with automatic compensation of tie-line losses[J]. Electric Power Components and Systems, 2012, 40(5/8): 807-828.
- [11] 徐征雄, 张文涛, 王 刚, 等. 利用移相器控制东北电网并行线路潮流的研究[J]. 电网技术, 1996(4): 6-10.
XU Zhengxiong, ZHANG Wentao, WANG Gang, et al. Application of phase - shifter for power flow control of parallel transmission lines[J]. Power System Technology, 1996(4): 6-10.
- [12] 孟絮絮. 高压交流及交直流并行输电线路电磁环境研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
MENG Xuxu. Study on electromagnetic environment of high voltage AC and AC/DC parallel transmission lines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [13] 徐 岩, 郅 静. 基于广域测量系统的潮流转移关键线路快速搜索[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 49-54.
XU Yan, ZHI Jing. Fast search of key lines in power flow transferring based on WAMS[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(5): 49-54.
- [14] ZHOU Xuesong, FAN Zhihao, MA Youjie, et al. Research review on electrical energy storage technology[C]//36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, China: IEEE, 2017: 10674-10678.
- [15] 高元海, 王 淳. 级数展开法拟合概率潮流分布函数的局限及改进[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5900-5910.
GAO Yuanhai, WANG Chun. Limitation analysis and improvement for series expansion methods to fit the distribution function of probabilistic power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5900-5910.
- [16] 谭清波, 陈 春, 曹一家, 等. 多源配电网主动孤岛恢复策略与动态组网潮流分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 142-151.
TAN Qingbo, CHEN Chun, CAO Yijia, et al. Intentional islanding recovery strategy and dynamic network power flow analysis for distribution networks with multisource[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 142-151.
- [17] 王 威, 何 宇, 王 波, 等. 一种多线路并发合环潮流计算方法[J]. 能源工程, 2018(1): 20-24.
WANG Wei, HE Yu, WANG Bo, et al. A simultaneous closed loop current calculation method for multiple distribution lines[J]. Energy Engineering, 2018(1): 20-24.
- [18] 张 健, 黄少锋, 李轶凡. 统一潮流控制器接入对距离保护的影响及对策[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 187-192.
ZHANG Jian, HUANG Shaofeng, LI Yifan. Analysis of the influence of UPFC on distance protection and the corresponding improved scheme[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 187-192.
- [19] 徐遐龄, 胡 伟, 王春明, 等. 考虑特征组合效应的电网关键稳定特征筛选方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2232-2238.
XU Xialing, HU Wei, WANG Chunming, et al. Research on power systems key feature selection based on combination effect considering the stability rule[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2232-2238.
- [20] 马 涛, 李 津, 曹晓波, 等. 计及用户行为差异性和配电网潮流的电采暖负荷群优化调度策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 77-87.
MA Tao, LI Jin, CAO Xiaobo, et al. Research on optimal dispatch strategy of electric heating load groups considering user behavior difference and distribution network power flow[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 77-87.
- [21] 邓慧琼, 李钦彬, 吴俊媛, 等. 潮流转移引发的电网连锁跳闸关键节点识别[J]. 福建工程学院学报, 2021, 19(3): 236-241.
DENG Huiqiong, LI Qinbin, WU Junyuan, et al. Identification of key nodes of power grid cascading trip caused by power flow transfer[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2021, 19(3): 236-241.
- [22] 吴奎华, 李文升, 吴肇贇, 等. 基于交替方向乘子的多能互补微电网分布式最优潮流调度[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 35-44.
WU Kuihua, LI Wensheng, WU Zhaoyun, et al. Distributed optimal power flow dispatch of multi-energy complementary microgrid based on alternating direction multiplier[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 35-44.
- [23] ZHI Jing, XU Yan. Power flow transferring path search and emergency control strategy[C]//IEEE 5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication. Beijing, China: IEEE, 2015: 380-383.
- [24] 曾 辉, 孙 峰, 李 铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [25] 史兴华. 南澳大利亚州大停电启示[J]. 国家电网, 2017(1): 58-61.
SHI Xinghua. South Australia blackout enlightenment[J]. State Grid, 2017(1): 58-61.
- [26] 何大禄, 廖建权, 王强钢. 基于三有源桥串并联直流潮流控制器的环形双极直流配电网不平衡潮流抑制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2837-2848.
HE Dalu, LIAO Jianquan, WANG Qianggang. Triple active bridge power flow controller based unbalanced power flow suppression for ring bipolar DC distribution network

- [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11):2837-2848.
- [27] 甄浩, 王谱宇, 孙晓蕾, 等. 计及电流潮流控制器的直流电网潮流计算[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 66-74.
ZHEN Hao, WANG Puyu, SUN Xiaolei, et al. Power flow calculation for DC power grid considering current flow controller[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 66-74.
- [28] 符杨, 刘冀宁, 周晓鸣, 等. 不平衡主动配电网综合直接潮流算法[J]. 电网技术, 2020, 44(6):2281-2288.
FU Yang, LIU Jining, ZHOU Xiaoming, et al. A comprehensive direct load flow algorithm for unbalanced active distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2281-2288.
- [29] 高雪寒, 高源, 赵健, 等. 基于数据潮流模型的高比例光伏配电网三相不平衡优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8):77-87.
GAO Xuehan, GAO Yuan, ZHAO Jian, et al. Three-phase unbalanced optimization of a distribution network with a high proportion of distributed photovoltaic energy based on a data-driven power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8):77-87.
- [30] LI K, THUMU R, REDDY K H, et al. Unified power flow controller in grid - connected hybrid renewable energy system for power flow control using an elitist control strategy[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2021, 43(1):228-247.
- [31] VURAL A M, WIRSIY E N. Three-phase modular multilevel converter based unified power flow controller[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020, 23(2):299-306.
- [32] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. UPFC的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 42-48.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross - coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10):42-48.
- [33] 和萍, 云磊, 赵琛, 等. 基于MSSA的PSS与UPFC-POD参数和UPFC位置协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1):174-187.
HE Ping, YUN Lei, ZHAO Chen, et al. Coordination of PSS and UPFC-POD parameters and UPFC position based on MSSA[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1):174-187.
- [34] 张振华, 江道灼. 基于MMC拓扑的UPFC控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3):73-77.
ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. Control strategy simulation of UPFC based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 73-77.
- [35] 马文忠, 孙伟, 王玉生, 等. 基于MMC的分布式储能系统及其快速SOC均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16):1-11.
MA Wenzhong, SUN Wei, WANG Yusheng, et al. Distributed energy storage system based on MMC and rapid SOC balancing control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16):1-11.
- [36] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定PI控制的SSSC潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 65-69.
WANG Hui, WANG Yaonan, XU Weidong. Investigation of a power flow controller of SSSC based on self-tuning PI controller with fuzzy logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7):65-69.
- [37] 李娟, 李方媛, 王鹏, 等. 改善风火打捆系统暂态稳定的限流式SSSC控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6):118-127.
LI Juan, LI Fangyuan, WANG Peng, et al. Current-limiting SSSC control strategy for improving transient stability of wind - thermal binding system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(6):118-127.

杨鹏(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力营销管理(E-mail: yangp@he.sgcc.com.cn)。

郭燕(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统潮流与控制(E-mail: guo_y77@163.com)。