

具有三相电流不平衡治理功能的柔性 互联装置控制研究

徐千禧¹, 赵杨阳², 陈雪妮¹, 于英俊¹, 由蕊¹

(1. 青岛大学 电气工程学院, 山东 青岛 266071;

2. 国网(苏州)城市能源研究院, 江苏 苏州 215000)

摘要:基于电力电子器件的柔性互联装置(FID)可实现配电台区间的功率互济,并可在配电台区故障后进行负荷转供。针对配电台区日益突出的三相不平衡问题,在FID对配电台区进行功率互济的基础上,提出了对配电台区进行三相电流不平衡治理的控制策略,提高了设备利用率。首先介绍了柔性互联装置的结构、数学模型及运行模式。其次,在原有FID对配电台区进行功率互济基础上,提出一种兼具三相电流不平衡治理功能的控制策略,对负荷三相不平衡电流进行补偿,实现三相平衡。最后,通过Matlab/Simulink仿真及StarSim硬件在环半实物实验对提出控制策略的有效性和可行性进行了验证。

关键词:柔性互联装置;功率互济;配电台区;三相不平衡

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26243

Research on Control of Flexible Interconnection Device with Three-phase Current Unbalance Mitigation Function

XU Qianxi¹, ZHAO Yangyang², CHEN Xueni¹, YU Yingjun¹, YOU Rui¹

(1. College of Electric Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China;

2. State Grid (Suzhou) City and Energy Research Institute, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: The load-transfer after the distribution area fault and mutual power support between distribution areas can be realized with the flexible interconnection device (FID) based on power electronic devices. Aiming at the becoming increasingly prominent three-phase unbalance problem, a three-phase current unbalance regulation control strategy according to the FID mutual power support to the distribution area was proposed, contributing to the increased equipment utilization efficiency. Firstly, the structure, mathematical model and operation mode of the FID were introduced. Secondly, a three-phase current unbalance regulation control strategy was proposed according to the original mutual power support to the distribution area. The three-phase balance can be realized with the three-phase current compensation. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy were verified by Matlab/Simulink simulation and the hardware-in-loop experiment on StarSim.

Key words: flexible interconnection device (FID); mutual power support; distribution area; three-phase unbalance

为应对能源危机并响应“双碳”政策,新能源装机容量不断增加,导致配电台区中分布式电源的渗透率快速提高^[1],其不确定性和波动性强等特点^[2],使配电台区面临着不同台区间功率时空差异明显、故障后恢复供电能力不足以及电能质量恶化等问题^[3-5]。同时,慢充电动汽车多采用单

相线路接入配电台区^[6],并且分布式光伏多采用单相并网^[7],造成配电台区三相电压不平衡加剧,从而影响配电台区的供电质量和可靠性。

随着电力电子技术的快速发展,柔性互联装置(flexible interconnection device, FID)得到了学术界和工业领域的关注^[8],该装置可实现时空层

基金项目:青岛市新兴产业培育计划(23-1-4-xxgg-5-gx)

作者简介:徐千禧(2000—),男,硕士,主要研究方向为主动配电网运行与协同控制,Email:17633706531@163.com

通讯作者:由蕊(1984—),男,博士,教授,主要研究方向为新能源发电、分布式发电与微电网,Email:yourui1984@163.com

面上的功率互补^[9],其具有的状态检测、快速响应和直流隔离功能在配电台区故障自愈过程中可发挥积极作用^[10]。文献[11]在多样化负荷和不同发电场景下,运用非线性优化方法,提出了基于FID的运行参数设计方案,提高了配电台区运行稳定性。文献[12]采用改进的Powell's direct set方法,优化了FID的运行模式,实现了馈线负荷的平衡和网络损耗的减少。文献[13]针对柔性互联配电台区,对其运行特点与控制模型方法进行了分析,提出了分层、协同的FID故障恢复控制策略,提高了柔性互联配电台区的供电可靠性。

在治理配电台区三相电压不平衡方面,当前主要采用投切电容器、静止无功发生器、自动换相装置等^[14-16]。其中,通过投切电容器进行无功补偿配电台区不平衡负荷得到了广泛应用,但其动作时间长且无法对无功功率连续调节;静止无功发生器响应速度快且可连续调节输出无功功率,但运维复杂且成本较高;自动换相装置通过在线切换用户负荷相位实现三相不平衡治理,但维护成本较高且耐久性差。总体而言,现有的三相不平衡治理方法存在功能单一和投资成本较高等问题。

与静止无功发生器类似,FID也采用电压源型变流器(voltage source converter, VSC)与配电台

区相连,具有对配电台区三相不平衡治理的潜力。本文在原有FID对配电台区进行功率互济基础上,提出一种兼具三相电流不平衡治理功能的控制策略,无需增加额外设备即可改善配电台区三相电流不平衡,具备降低成本以及提高设备利用率等优势。本文首先介绍了配电台区柔性互联装置的结构、数学模型及运行模式;然后,提出了配电台区三相电流不平衡治理控制策略,对负荷三相不平衡电流进行补偿,实现三相平衡;最后,通过在Matlab/Simulink软件的仿真及在Star-Sim HIL硬件平台的实验,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

1 配电台区柔性互联装置及其运行模式

1.1 柔性互联装置结构及数学模型

FID由两台或多台电压源型变流器VSC和直流母线电容构成,以两端型FID为例,其与配电台区连接结构如图1所示,每台VSC交流端口分别连接各交流馈线,直流端口连接于直流母线电容。其中, u_{siabc} 和 i_{siabc} 分别为交流馈线 i 三相电压和电流($i=1,2$); u_{viabc} 和 i_{viabc} 分别为VSC i 输出三相电压和电流; U_{dc} 为直流母线电压; R 为线路等效电阻; L 为滤波电感; C_1 和 C_2 为分裂电容。

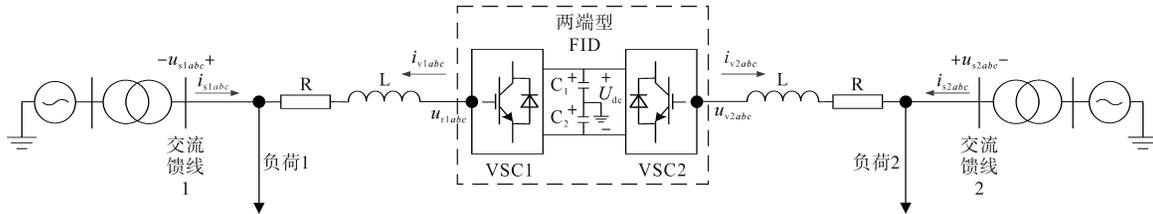


图1 两端型FID与配电台区连接结构图

Fig.1 Diagram of connection structure between a two-end type FID and distribution areas

由于每台VSC拓扑完全相同,因此选取其中一台VSC进行建模分析。为简化分析,假设主电路拓扑每相参数相同,通过基尔霍夫电压定律与Park坐标变换得到 d - q 坐标系下VSC i 数学模型为

$$\begin{cases} u_{vid} = L \frac{di_{vid}}{dt} + Ri_{vid} + u_{sid} - \omega Li_{viq} \\ u_{viq} = L \frac{di_{viq}}{dt} + Ri_{viq} + u_{siq} + \omega Li_{vid} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{vid} , u_{viq} 分别为VSC i 交流侧输出电压 d 轴和 q 轴分量; i_{vid} , i_{viq} 分别为VSC i 交流侧输出电流 d 轴和 q 轴分量; u_{sid} , u_{siq} 分别为交流馈线 i 电压 d 轴和 q 轴分量; ω 为基波角频率。

将交流馈线 i 电压矢量定向于 d 轴方向,结合

瞬时功率理论,可得VSC i 交流侧输出电流 d 轴和 q 轴分量的目标值^[17]:

$$\begin{cases} i_{vid}^* = 2P_{vi}^*/(3u_{vid}) \\ i_{viq}^* = -2Q_{vi}^*/(3u_{viq}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{vi}^* 和 Q_{vi}^* 分别为VSC i 输出有功功率和无功功率目标值,通过与VSC i 相连配电台区的潮流动态计算获得^[18]。

1.2 柔性互联装置运行模式

对于两端型FID,在配电台区1和配电台区2正常运行情况下,其中一台VSC运行于定直流母线电压($U_{dc}-Q$)控制模式,稳定直流母线电压,维持系统功率平衡,并可向其连接馈线提供无功功率,控制结构如图2所示,图2中 U_{dc}^* 为直流母线

电压目标值, θ 为锁相环(phase-locked loop, PLL) 输出角。另一台 VSC 运行于有功功率和无功率($P-Q$)控制模式, 控制 VSC 输出有功和无功率与 P_{vi}^* 和 Q_{vi}^* 一致, 从而优化配电台区潮流分布, 控制结构如图 3 所示。若某一配电台区发生故障, 其所连接 VSC 切换至恒压恒频($U-f$)控制模式, 充当电压源为被隔离负荷提供具有稳定幅值和频率的电压, 控制结构如图 4 所示, V_{rms}^* 为被隔离负荷的额定线电压; 另一台 VSC 则运行于 $U_{dc}-Q$ 控制模式, 实现对被隔离负荷的供电恢复。

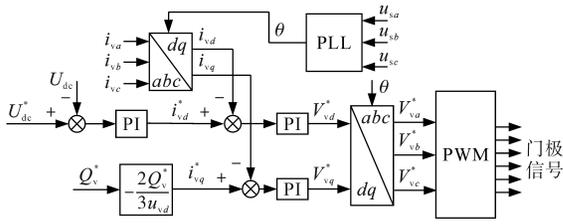


图2 $U_{dc}-Q$ 模式控制结构图

Fig.2 Control structure diagram of $U_{dc}-Q$ mode

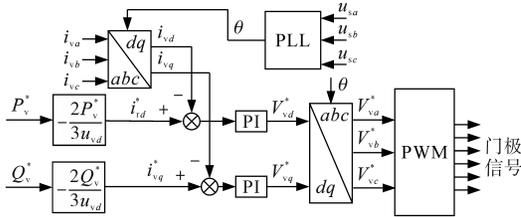


图3 $P-Q$ 模式控制结构图

Fig.3 Control structure diagram of $P-Q$ mode

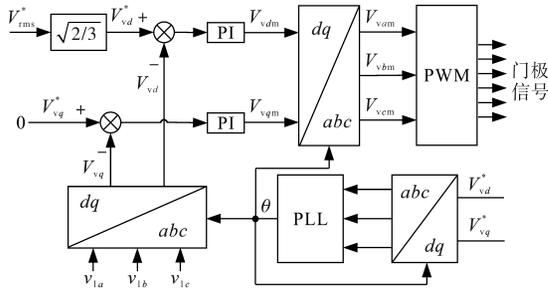


图4 $U-f$ 模式控制结构图

Fig.4 Control structure diagram of $U-f$ mode

多端型 FID 可对多个配电台区进行互联, 当所连接配电台区均正常运行时, 选取其中一台运行于 $U_{dc}-Q$ 控制模式, 其余 VSC 运行于 $P-Q$ 控制模式。若某一台区发生故障, 则故障侧 VSC 切换至 $U-f$ 控制模式, 其余 VSC 中一台运行于 $U_{dc}-Q$ 控制模式, 剩余 VSC 仍运行于 $P-Q$ 控制模式。

2 配电台区三相电流不平衡治理控制策略

2.1 三相负荷电流谐波检测算法

配电台区三相负荷电流谐波的检测精度, 影

响着 FID 对不平衡负荷电流的最终补偿效果, 为了准确、快速地提取三相负荷电流谐波, 本文基于瞬时无功率理论^[19], 采用广义 i_p-i_q 谐波电流检测方法并结合零序分量分离单元, 将负荷不平衡电流除正序基波分量以外谐波分量提取, 得到谐波电流补偿指令值。其中, i_p 为瞬时有功电流, i_q 为瞬时无功电流。

2.1.1 正序谐波分量检测

为方便分析, 假设 u_a, u_b, u_c 分别为交流馈线 abc 三相瞬时电压, 其幅值均为 U 。 i_a, i_b, i_c 分别为负荷 abc 三相瞬时电流, 通过 Clarke 变换, 得到两相坐标系中的瞬时电压 u_α, u_β 和瞬时电流 i_α, i_β , 变换矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U \sin(k\omega t) \\ U \sin(k\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ U \sin(k\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \\ = \sqrt{\frac{2}{3}} U \begin{bmatrix} \sin k\omega t \\ -\cos k\omega t \end{bmatrix} \quad k=1,2,\dots,n \quad (3)$$

其中

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

瞬时有功功率 p 为电压矢量 u 的模 u_0 和瞬时有功电流 i_p 的乘积, 瞬时无功功率 q 为电压矢量 u 的模 u_0 和瞬时无功电流 i_q 的乘积, 即

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 i_p \\ u_0 i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据 $u_0^2=1.5U^2$, 把式(3)和式(6)联立得 i_p 和 i_q 正序分量:

$$\begin{bmatrix} i_{pk}^+ \\ i_{qk}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & -\sin(k\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ = C_1^+ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_1^+ C_{32} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于 ButterWorth 数字低通滤波器具有良好的响应速度和跟踪性能, 可以提高谐波检测精度^[20], 因此本文采用 3 阶且截止频率为 20 Hz 的 ButterWorth 数字低通滤波器(low pass filter, LPF),

获得对应的直流分量 i_{pkz}^+, i_{qkz}^+ 。接着将式(7)进行反变换,即可得到三相不平衡负荷电流在ABC坐标系下正序谐波电流分量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{Ak}^+ \\ i_{Bk}^+ \\ i_{Ck}^+ \end{bmatrix} &= \mathbf{C}_{23} \begin{bmatrix} \sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & -\sin(k\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pkz}^+ \\ i_{qkz}^+ \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{C}_{23} \mathbf{C}_2^+ \begin{bmatrix} i_{pkz}^+ \\ i_{qkz}^+ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{C}_{23} = \mathbf{C}_{32}^T$; \mathbf{C}_2^+ 为 \mathbf{C}_1^+ 的逆矩阵, $\mathbf{C}_2^- = \mathbf{C}_1^-$ 。

2.1.2 负序谐波分量检测

将式(3)中三相瞬时电压 u_A, u_B, u_C 的相序改写为负序的形式,便可以检测出负序分量,检测方法为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} &= \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} U \sin(k\omega t) \\ U \sin(k\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ U \sin(k\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} U \begin{bmatrix} \sin(k\omega t) \\ \cos(k\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(6)和式(9)得 i_p 和 i_q 负序分量:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{pk}^- \\ i_{qk}^- \end{bmatrix} &= \frac{1}{u_0} \begin{bmatrix} -u_\alpha & -u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & \sin(k\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

把式(5)代入(10)中得:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{pk}^- \\ i_{qk}^- \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & \sin(k\omega t) \end{bmatrix} \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{C}_1^- \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

然后通过LPF获得对应的直流分量 i_{pkz}^-, i_{qkz}^- ,再将式(11)进行反变换,即可得到三相不平衡负荷电流在ABC坐标系下负序谐波电流分量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{Ak}^- \\ i_{Bk}^- \\ i_{Ck}^- \end{bmatrix} &= \mathbf{C}_{23} \begin{bmatrix} -\sin(k\omega t) & -\cos(k\omega t) \\ -\cos(k\omega t) & \sin(k\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pkz}^- \\ i_{qkz}^- \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{C}_{23} \mathbf{C}_2^- \begin{bmatrix} i_{pkz}^- \\ i_{qkz}^- \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, \mathbf{C}_2^- 为 \mathbf{C}_1^- 的逆矩阵,这里 $\mathbf{C}_2^- = \mathbf{C}_1^-$ 。

2.1.3 零序分量检测

在三相四线制系统中,三相不平衡电流会产生零序分量,造成变压器损耗加大,影响配电台区供电可靠性。本文采用下式所示的零序分量

公式提取出负荷三相不平衡电流的零序分量:

$$i_0 = \frac{i_a + i_b + i_c}{3} \quad (13)$$

基于上述公式,可得到在治理三相电流不平衡时,三相负荷电流谐波检测算法框图如图5所示,其谐波电流检测流程如下:

首先,将负荷三相不平衡电流 i_{ia}, i_{ib}, i_{ic} 经过零序分量分离单元式(13),分离出零序电流分量 i_0 ;接着分别通过正序变换矩阵 $\mathbf{C}_{32} \mathbf{C}_1^+$ 和负序变换矩阵 $\mathbf{C}_{32} \mathbf{C}_1^-$,得到正序有功、无功分量 i_{pk}^+, i_{qk}^+ 和负序有功、无功分量 i_{pk}^-, i_{qk}^- ;然后分别经过LPF滤波,得出各自相应的直流分量 i_{pkz}^+, i_{qkz}^+ 和 i_{pkz}^-, i_{qkz}^- 。

其次,将通过LPF得到的直流分量 i_{pkz}^+, i_{qkz}^+ 和 i_{pkz}^-, i_{qkz}^- ,分别通过正序反变换 $\mathbf{C}_2^+ \mathbf{C}_{23}$ 和负序反变换 $\mathbf{C}_2^- \mathbf{C}_{23}$,即可得出三相负荷电流的各相正序谐波分量和 $\Sigma i_{Ak}^+, \Sigma i_{Bk}^+, \Sigma i_{Ck}^+$,以及各相负序谐波分量和 $\Sigma i_{Ak}^-, \Sigma i_{Bk}^-, \Sigma i_{Ck}^-$ 。

最后,将负荷电流的各相正序谐波分量之和、负序谐波分量之和以及零序分量 i_0 分别相加,得到三相负荷电流谐波补偿指令值 $i_{ah}^*, i_{bh}^*, i_{ch}^*$ 。

上述变换矩阵中所需的锁相角度 ωt 由PLL获得,对应的 $k\omega t$ 只需乘以所需的 k 次倍系数即可。本文设置正序谐波电流检测次数 k 为3到19的奇数次,负序谐波电流检测次数 k 为1到19的奇数次。

2.2 基于负荷谐波电流的FID控制

若由VSC提供不平衡负荷电流的谐波分量,则配电台区仅需提供其电流正序基波分量部分,有利于降低该配电台区的三相不平衡度。因此,本文提出了一种具有对配电台区三相电流不平衡治理功能的FID控制策略,其控制结构如图5所示,由VSCi控制模式选择与功率电流计算、三相负荷电流谐波检测和电流闭环控制三部分组成。

1) VSCi控制模式选择与功率电流计算部分:首先根据配电台区实际运行情况,对FID中的各台VSC控制模式进行相应选择,然后计算出VSC功率互济参考电流值。运行于 $U_{dc} - Q$ 控制模式的VSC维持直流母线电压稳定,确保配电台区FID的平稳运行,控制方式采用电网电压定向的双闭环矢量控制,包括电压外环与电流内环。电压外环控制直流母线电压,将直流母线电压目标值与实际值比较,误差经PI调节器得到VSC交流侧输出电流 d 轴分量目标值 i_{vd}^* , q 轴分量目标值 i_{vq}^* 根据其输出无功功率目标值求取,一般设为0。运行

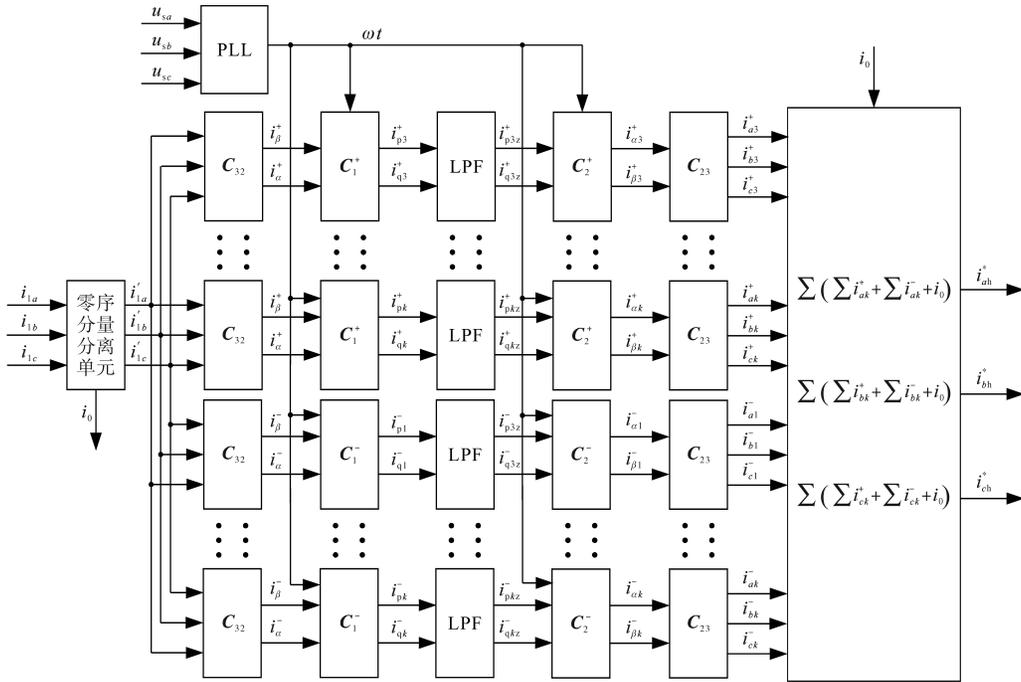


图5 三相负荷电流谐波检测算法框图

Fig.5 The block diagram of three-phase load current harmonic detection algorithm

于P-Q控制模式的VSC可独立发出配电台区所需互济的有功功率与无功功率,通过配电台区潮流动态计算获得有功和无功功率目标值 P_v^* 和 Q_v^* ,经式(2)得到VSC交流侧输出电流d轴和q轴分量的目标值 i_{vd}^* 和 i_{vq}^* 。最后将上述 $U_{dc}-Q$ 或 $P-Q$ 控制模式中得到的 i_{vd}^* 和 i_{vq}^* 经过Park反变换运算后得到功率互济参考电流值 $i_{a1}^*, i_{b1}^*, i_{c1}^*$ 。

假设两端型FID中,VSC1运行于 $U_{dc}-Q$ 控制模式,通过电压电流双闭环控制,将直流母线电压目标值与实际值进行比较后,误差输入至PI调节器得到VSC1交流侧输出电流d轴分量目标值 i_{vd}^* ,q轴分量目标值 i_{vq}^* 设为0,然后将 i_{vd}^* 和 i_{vq}^* 进行Park反变换,得到VSC1功率互济参考电流值;VSC2运行于 $P-Q$ 控制模式,由VSC2输出有功和无功功率目标值 P_v^* 和 Q_v^* ,通过式(2)得到VSC2输出电流d轴和q轴分量目标值 i_{vd}^* 和 i_{vq}^* ,然后将其进行Park反变换,得到VSC2功率互济参考电流值。而多端型FID中,运行于 $U_{dc}-Q$ 和 $P-Q$ 控制模式的VSC功率互济参考电流值求取方法与上述相同。

2)三相负荷电流谐波检测部分:通过2.1节所述的三相负荷电流谐波检测算法,提取出谐波电流补偿指令值 $i_{ah}^*, i_{bh}^*, i_{ch}^*$ 。

3)电流闭环控制部分:首先,将VSC功率互济参考电流值 $i_{a1}^*, i_{b1}^*, i_{c1}^*$ 与谐波电流补偿指令值 $i_{ah}^*, i_{bh}^*, i_{ch}^*$ 叠加,得到VSC总输出电流指令值 $i_{va}^*, i_{vb}^*, i_{vc}^*$;

然后,将VSC总输出电流指令值 $i_{va}^*, i_{vb}^*, i_{vc}^*$ 与VSC实际输出电流值 i_{va}, i_{vb}, i_{vc} 进行比较,得到误差信号后,经过采用稳定性好、响应迅速的滞环电流比较方式的PWM跟踪控制算法,输出VSC开关管门极控制信号,控制VSC输出所需的补偿电流。从而在FID实现对配电台区功率互济的同时,解决了配电台区三相电流不平衡问题,提高了配电台区的供电可靠性。

3 仿真分析与实验验证

3.1 仿真分析

为验证本文提出的具有对配电台区三相电流不平衡治理功能的FID控制策略的有效性,在Matlab/Simulink软件平台上搭建了如图6所示的两端型FID与配电台区相连接的仿真模型,并设置VSC1运行于 $U_{dc}-Q$ 控制模式,VSC2运行于 $P-Q$ 控制模式,模型仿真参数如表1所示。

仿真设置不平衡线性负荷与不平衡非线性负荷两种工况,不平衡线性负荷工况设置负荷1为(1.21 Ω, 0.97 Ω, 0.81 Ω),负荷2为(2.42 Ω, 1.61 Ω, 1.21 Ω);不平衡非线性负荷工况设置负荷1为三相整流桥与负荷(1.61 Ω, 1.21 Ω, 0.97 Ω)并联而成,负荷2为三相整流桥与负荷(2.42 Ω, 1.94 Ω, 1.34 Ω)并联而成,负荷1和2的三相整流桥直流侧均连接10 Ω电阻。

在不平衡线性负荷工况下,控制VSC1在0.2 s

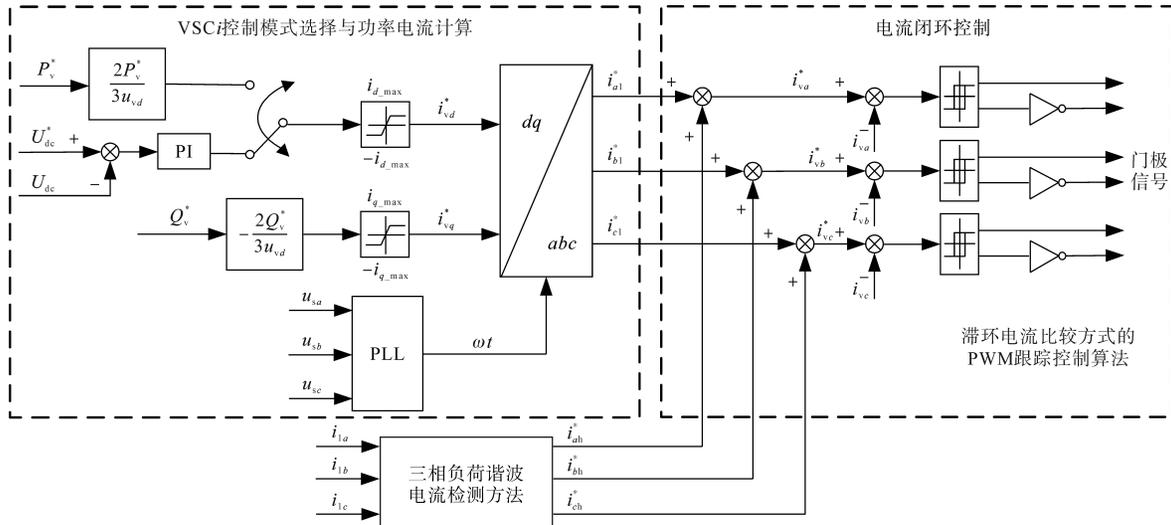


图6 具有对配电台区三相电流不平衡治理功能的FID控制框图

Fig.6 The control block diagram of FID with the function of regulating three-phase current unbalance in distribution areas

和 0.3 s 分别注入负序和零序补偿电流;控制 VSC2 在 0.3 s 和 0.4 s 分别注入负序和零序补偿电流;并在 0.6 s 控制 VSC2 输出有功功率从 0 增加至 30 kW。在不平衡非线性负荷工况下,控制 VSC1 在 0.1 s, 0.2 s 和 0.3 s 分别注入正序电流谐波分量、负序电流谐波分量和零序电流分量;控制 VSC2 在 0.2 s, 0.3 s 和 0.4 s 分别注入正序电流谐波分量、负序电流谐波分量和零序电流分量;并在 0.6 s 控制 VSC2 输出有功功率从 0 增加至 5 kW。

表1 仿真参数

Tab.1 Parameters of simulation

参数		数值
FID	额定直流电压	750 V
	VSC 额定容量	100 kV·A
	直流电容	0.02 F
	滤波电感	1.5 mH
	开关频率	10 kHz
配电台区	额定线电压	380 V
	额定容量	200 kV·A
	额定频率	50 Hz
LPF	截止频率	30 Hz
	滤波器阶数	3
滞环比较器	滞环环宽	0.05

3.1.1 不平衡线性负荷工况

VSC1 交流侧输出电流 i_{VSC1} 及其各序分量 i_{p1}, i_{n1}, i_{z1} 如图 7 所示, 下标 p, n, z 分别表示正序、负序、零序。VSC2 交流侧输出电流 i_{VSC2} 及其各序分量如图 8 所示。交流馈线 1 侧电流 i_{z1} 与交流馈线 2 侧电流 i_{z2} 分别如图 9 和图 10 所示。

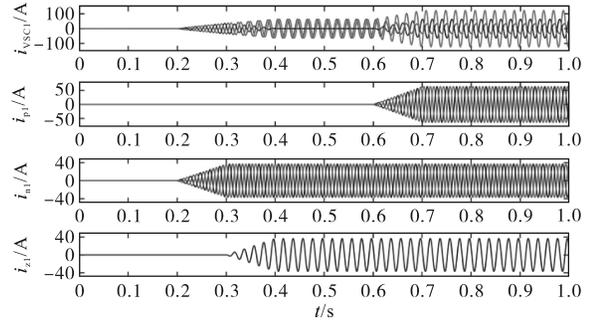


图7 VSC1输出电流及其各序分量(线性负荷)

Fig.7 Output current of VSC1 and its sequence components (linear load)

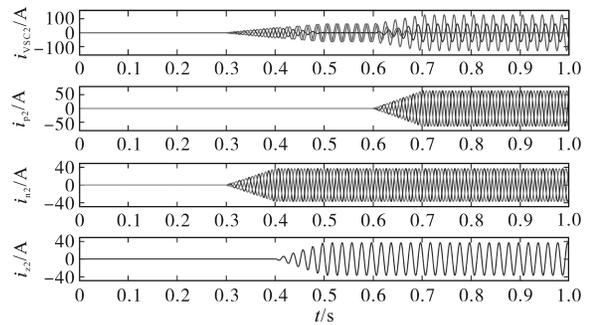


图8 VSC2输出电流及其各序分量(线性负荷)

Fig.8 Output current of VSC2 and its sequence components (linear load)

可以看出,在产生负荷三相不平衡问题时,配电台区馈线侧电流会出现幅值和相位均不平衡的现象;VSC1 从 0.4 s 开始实现了对负荷 1 不平衡电流补偿,使馈线 1 仅对其提供电流基波正序分量;VSC2 从 0.5 s 开始实现了对负荷 2 的不平衡电流补偿,使馈线 2 仅对其提供电流基波正序分量;在 0.7 s 时, FID 通过潮流控制,使配电台区 2 向配电台区 1 传输了 30 kW 有功功率,最终使二

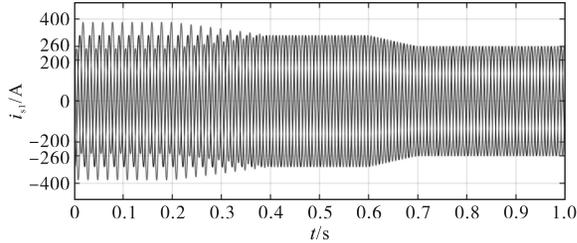


图9 交流馈线1侧电流 i_{s1} (线性负荷)

Fig.9 AC feeder 1 side current i_{s1} (linear load)

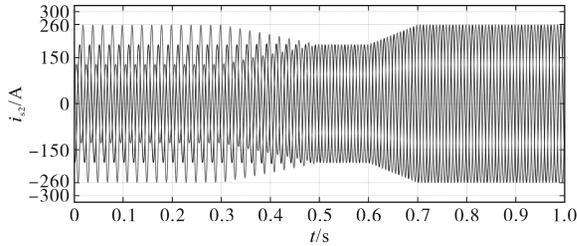


图10 交流馈线2侧电流 i_{s2} (线性负荷)

Fig.10 AC feeder 2 side current i_{s2} (linear load)

者三相平衡电流的幅值均在 260 A 左右,实现了对配电台区的潮流优化。通过两台 VSC 独立的不平衡负荷电流控制,实现了交流馈线侧电流三相平衡,而补偿后 i_{s1} 和 i_{s2} 的平衡有助于 VSC2 互济功率的准确求取,提高了电能质量。

3.1.2 不平衡非线性负荷工况

VSC1 交流侧输出电流 i_{VSC1} 及其各序分量 i_{p1} , i_{n1} , i_{z1} 如图 11 所示, VSC2 交流侧输出电流 i_{VSC2} 及其各序分量如图 12 所示。交流馈线 1 侧电流 i_{s1} 与交流馈线 2 侧电流 i_{s2} 分别如图 13 和图 14 所示。

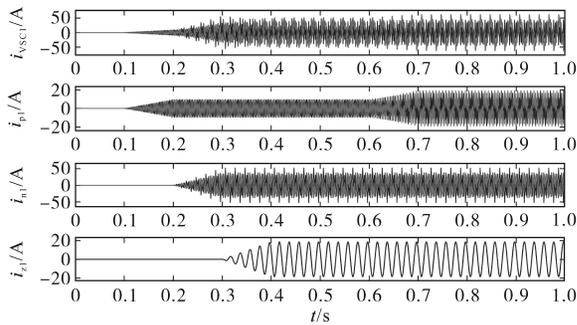


图11 VSC1 输出电流及其各序分量(非线性负荷)

Fig.11 Output current of VSC1 and its sequence components(nonlinear load)

可以看出, FID 未进行电流补偿前, 不平衡非线性负荷使馈线电流三相不平衡且存在明显谐波成分; VSC1 从 0.4 s 开始实现了对负荷 1 不平衡电流补偿, 使馈线 1 仅对其提供电流基波正序分量; VSC2 从 0.5 s 开始实现了对负荷 2 的不平衡电流补偿, 使馈线 2 仅对其提供电流基波正序分量; 馈线电流 i_{s1} 和 i_{s2} 各自的总谐波失真率分别从 17.57% 和 18.06% 降低到 0.47% 和 0.65%; 在 0.7 s

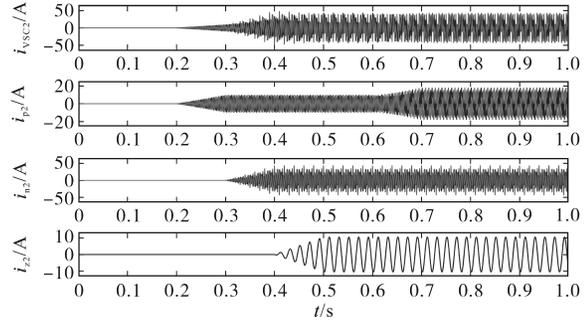


图12 VSC2 输出电流及其各序分量(非线性负荷)

Fig.12 Output current of VSC2 and its sequence components(nonlinear load)

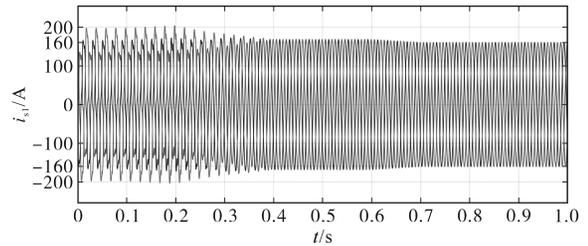


图13 交流馈线1侧电流 i_{s1} (非线性负荷)

Fig.13 AC feeder 1 side current i_{s1} (nonlinear load)

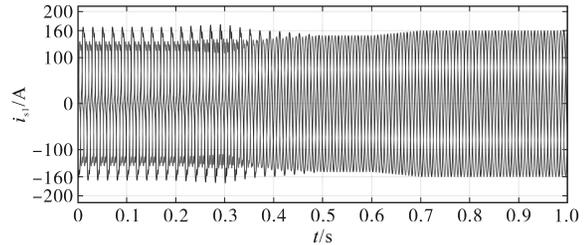


图14 交流馈线2侧电流 i_{s2} (非线性负荷)

Fig.14 AC feeder 2 side current i_{s2} (nonlinear load)

时, FID 通过潮流控制, 使配电台区 2 向配电台区 1 传输了 5 kW 有功功率, 最终使二者三相平衡电流的幅值均在 160 A 左右, 优化了配电台区潮流分布。通过两台 VSC 独立的不平衡负荷电流控制, 实现了交流馈线侧电流三相平衡, 而补偿后 i_{s1} 和 i_{s2} 的平衡有助于 VSC2 互济功率的准确求取。

3.2 实验验证

为进一步验证本文所提三相电流不平衡补偿控制策略的有效性, 搭建了如图 15 所示的 Star-Sim HIL 实时在环实验平台。由 NI-PXIE-1071 实时半实物系统模拟如图 1 所示的两端型 FID 与配电台区连接拓扑, 步长设置为 10 μ s; 使用 TMS320 F28335 DSP 作为控制器, 采样频率设为 10 kHz。

实验设置了不平衡线性负荷和不平衡非线性负荷两种工况, 负荷 1 和负荷 2 与仿真部分相同。不平衡线性负荷工况下, 交流馈线电流 i_{s1} 和 i_{s2} 补偿前后的实验波形如图 16 所示; 不平衡非线性负荷工况下, 交流馈线电流 i_{s1} 和 i_{s2} 补偿前后的

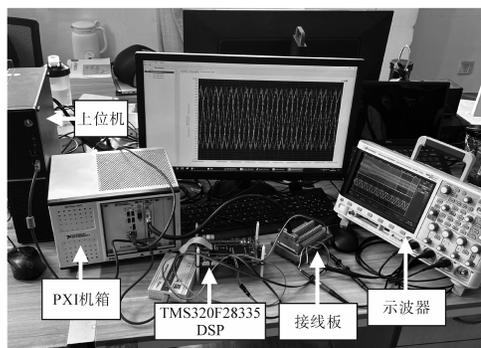


图15 StarSim HIL实时在环实验平台

Fig.15 Hardware-in-the-loop experimental platform based on StarSim HIL

实验波形如图17所示。可以看出,在FID进行不平衡电流补偿后,实现了馈线电流 i_{s1} 和 i_{s2} 的三相平衡,并且VSC2通过有功功率传输对两配电台区进行潮流优化,使交流馈线电流 i_{s1} 和 i_{s2} 的幅值基本相等,改善了配电台区电能质量。

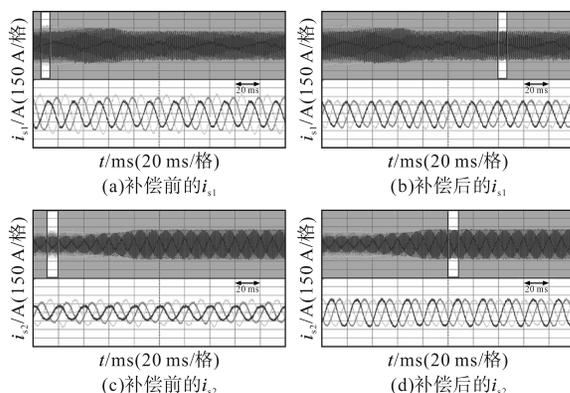


图16 不平衡线性负荷工况实验波形图

Fig.16 Experimental waveforms of unbalanced linear load condition

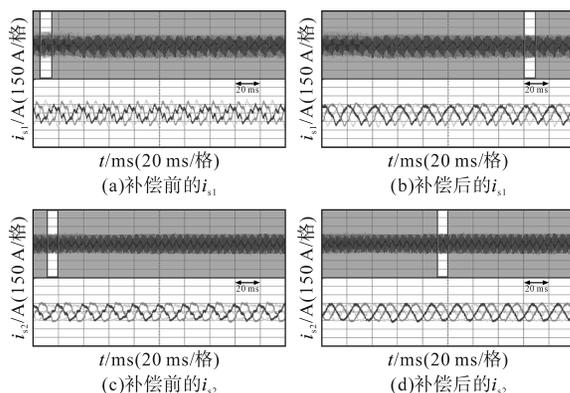


图17 不平衡非线性负荷工况实验波形图

Fig.17 Experimental waveforms of unbalanced nonlinear load condition

在配电台区三相电流不平衡治理方面,传统的平衡治理方法是采用投切电容器、静止无功发生器和自动换相装置等,虽可对配电台区三相电流不平衡进行治理,但存在功能单一和投资成本较高等问题。传统的FID具有潮流优化功能,

但不具有三相电流不平衡治理功能。通过仿真与实验可以看出,本文在FID原潮流优化功能基础上,实现了三相电流不平衡治理,从而表明本文所提控制策略充分利用了FID的潜力,无需增加额外设备即可解决三相电流不平衡问题,与传统不平衡治理策略相比,具备降低成本以及提高设备利用率等优势。

4 结论

本文在FID对配电台区进行潮流优化基础上,提出了一种对配电台区三相电流不平衡治理控制策略。基于瞬时无功功率理论,采用广义 i_p-i_q 谐波电流检测方法提取三相负荷电流谐波分量,将其叠加于FID功率互济参考电流,使配电台区仅向负荷提供三相平衡电流,从而改善配电台区三相电压不平衡。由于FID直流侧电容的解耦作用,因此各端VSC可分别对其所连接配电台区进行独立补偿;FID在不进行功率互济的情况下,也可对所连接配电台区三相电压不平衡进行改善。从而提高设备利用率。

本文实际硬件实验平台正在搭建中,因此后续研究工作中,将聚焦于通过实际硬件实验进一步验证本文所提控制策略的有效性。并且本文所提三相电流不平衡治理控制策略暂未考虑FID与传统治理设备(如静止无功发生器、自动换相装置等设备)协调控制的问题,未来将针对此问题开展深入研究。

参考文献

- [1] 李舒涵,黄文靖,李志刚,等.含储能接入的三相配电网分布式可再生能源可调度域建模与计算[J].电网技术,2024,48(7):2765-2774.
LI Shuhan, HUANG Wenjing, LI Zhigang, et al. Modeling and computation of dispatchable region for distributed renewable energy resources in three-phase distribution network with energy storage[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2765-2774.
- [2] HAGUE M M, WOLFS P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(62):1195-1208.
- [3] 唐巍,张起铭,张璐,等.新型配电系统多层次交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化,2023,47(6):2-17.
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC in-

- terconnection in new distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 2-17.
- [4] 王皓靖,郭佩乾,时珊珊,等.中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J].*电力系统自动化*, 2025, 49(5): 13-23.
- WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of multi-substation flexible interconnection technology in medium voltage distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(5): 13-23.
- [5] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].*高电压技术*, 2021, 47(9): 3021-3035.
- DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [6] 黄晶,王秀丽,邵成成,等.考虑新能源配网三相不平衡治理的电动汽车充电策略[J].*电网技术*, 2024, 48(9): 3663-3672.
- HUANG Jing, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Charging strategy of electric vehicles considering three-phase unbalance mitigation of distribution network with new energy[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3663-3672.
- [7] 李征,王文宾,韩胜峰,等.考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J].*电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 32-41.
- LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage-adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(11): 32-41.
- [8] 刘文龙,吕志鹏,刘海涛.电力电子化配电台区形态发展以及运行控制技术综述[J].*中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 4899-4922.
- LIU Wenlong, LÜ Zhipeng, LIU Haitao. An overview of morphological development and operation control technology of power electronics dominated distribution area[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 4899-4922.
- [9] 李振,盛万兴,段青,等.基于储能稳压的交直流混合电能路由器协调控制策略[J].*电力系统自动化*, 2019, 43(2): 121-129.
- LI Zhen, SHENG Wanxing, DUAN Qing, et al. Coordinated control strategy of AC/DC hybrid power router based on voltage stabilization by energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(2): 121-129.
- [10] 宋毅,孙充勃,李鹏,等.基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J].*中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4390-4398.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4390-4398.
- [11] LONG C, WU J Z, THOMAS L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution areas with distributed generation[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 427-437.
- [12] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 36-47.
- [13] HUANG S, WU S, ZHANG J Q, et al. Research on and application of fault disposal in flexible interconnection distribution network[C]//2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, Dalian, China, 2020.
- [14] 张国荣,廖兵,彭勃,等.电网电压不平衡条件下混合无功补偿系统分层协调控制策略[J].*电测与仪表*, 2019, 56(5): 6-12, 25.
- ZHANG Guorong, LIAO Bing, PENG Bo, et al. Hierarchical coordinated control strategy of hybrid reactive compensation system under unbalanced grid voltage[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(5): 6-12, 25.
- [15] 陆钟华.配电网台区三相不平衡治理技术研究[J].*电力电子技术*, 2021, 55(9): 40-42.
- LU Zhonghua. Research on the three-phase unbalanced treatment technology in distribution area[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(9): 40-42.
- [16] 李家桥,王国帮,张明乐,等.面向台区三相不平衡治理的自动换相装置选址定容规划[J].*电力系统自动化*, 2022, 46(19): 62-69.
- LI Jiaqiao, WANG Guobang, ZHANG Mingle, et al. Siting and sizing planning of automatic commutation device for three-phase unbalance mitigation in distribution station area[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(19): 62-69.
- [17] 余洋,王孟云,张瑞丰,等.基于反推控制的储能系统并网变流器直接PQ控制策略[J].*电力科学与工程*, 2021, 37(10): 11-17.
- YU Yang, WANG Mengyun, ZHANG Ruifeng, et al. Direct PQ control strategy for grid-connected inverter of energy storage system based on backstepping control[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2021, 37(10): 11-17.
- [18] 杨溢,郭志忠.含电磁环网的输配电网全局动态潮流主从分裂算法[J].*电力系统自动化*, 2019, 43(14): 143-150.
- YANG Yi, GUO Zhizhong. Master-slave splitting algorithm of global dynamic power flow for transmission and distribution networks with electromagnetic loop networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 143-150.
- [19] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, IA-20(3): 625-630.
- [20] 张利,薛涛,张凤.谐波检测算法中Butterworth低通滤波器优化设计及实现[J].*电气传动*, 2015, 45(5): 35-38, 45.
- ZHANG Li, XUE Tao, ZHANG Feng. Optimal design and implementation of butterworth low pass filter in harmonic detection algorithm[J]. *Electric Drive*, 2015, 45(5): 35-38, 45.

收稿日期:2024-10-21

修改稿日期:2024-12-20