

一种配变三相负荷不平衡的 自动均衡控制方法

赵波¹, 胡娟², 程怡捷³, 祁欢欢⁴

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
3. 国网长沙供电公司, 湖南长沙 410015; 4. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:配电网中单相负荷的大量接入导致三相负荷不平衡,为解决配电网中三相负荷不平衡带来的一系列危害,首先提出一种配变三相不平衡负荷自动均衡控制方法,以降低配变的三相不平衡度;然后系统地分析换相式不平衡负荷自动均衡控制系统的结构,设计控制流程及其换相策略,并详细说明基于复合式开关的换相单元的断路器和晶闸管的控制流程;最后建立配变三相不平衡的仿真模型,验证控制策略和流程的正确性。

关键词:三相不平衡负荷;自动均衡控制;换相单元;机械式开关;复合式开关

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.005 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2022)01-0041-07

An automatic balancing control method on unbalanced three-phase loads of distribution transformer

ZHAO Bo¹, HU Juan², CHENG Yijie³, QI Huanhuan⁴

(1. School of Automatic, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192; 3. State Grid Changsha Power Supply Company, Changsha 410015, China;
4. Global Energy Internet Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The integration of a large number of single-phase loads in distribution networks could lead to the imbalance of three-phase power flow. In order to eliminate a series of hazards caused by the unbalanced three-phase loads in distribution networks, an automatic balance control method is proposed to mitigate the degree of the three-phase unbalance of the distribution transformer. Subsequently, the structure of the commutation type unbalanced load automatic balance control system is systematically analyzed, and the commutation control flow and commutation strategy are further designed. The control flow of the circuit breaker and thyristor of the commutation unit based on the composite switch is elaborated. Finally, a three-phase unbalanced simulation model of the distribution transformer is established to verify the effectiveness of the proposed control strategy and control flow.

Key words: unbalanced three-phase loads; automatic balancing control; commutation unit; mechanical switch; compound switch

收稿日期:2020-06-13;修回日期:2020-07-24

基金项目:新能源与储能运行控制国家重点实验室开放基金(DGB51201901183)

通信作者:赵波(1977-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用开发研究;E-mail:lingshanisland@126.com

中国低压配电网大多以三相四线制给用户供电,然而配电网中单相负荷数量剧增,并且不平衡接入三相电网。同时,受季节和用电习惯等影响,配电网单相负荷用电具有随机性和不同步性。这些都将导致配电网的三相负荷不平衡。配电变压器是直接给负荷供电的电力设备,负荷三相不平衡会使变压器的出力降低、损耗增加、某相或中性线的导线烧坏、局部过热甚至烧毁^[1-6]。

目前,解决配变三相不平衡的方法有加装补偿装置、人工换相调整和加装负荷自动均衡控制装置等^[7-9]。加装补偿装置的方法是利用有源滤波器(active power filter, APF)等补偿装置对三相负载进行补偿,从而减小三相不平衡度,该方法只能调节补偿点以上线路的三相不平衡,补偿点以下仍然三相不平衡。人工换相调整和加装负荷自动均衡控制装置的方法均是通过对负荷换相调整,使三相负荷尽量均衡,该方法从源头上解决三相不平衡问题,但是人工换相调整需要大量操作人员,而负荷自动均衡控制的方法则通过实时采集用户的数据,按照均衡控制策略,计算出均衡控制方案,自动控制换相开关进行换相调整,节省了人力成本。

目前已有一些文献对负荷自动均衡控制方法进行了研究。文献[8]提出基于微分进化算法计算负荷均衡控制方案,采用机械式换相开关进行换相调整,但是算法没有考虑器件寿命等因素,也没有给出详细的控制策略;文献[10]着重于介绍基于模拟结

晶算法的负荷均衡控制方案,比较了几种典型智能算法对于调整不平衡度的效果,但是没有给出换相单元的结构;文献[11-12]分别提出了机械式换相开关和复合式换相开关的换相单元结构,而对于换相算法的介绍及对换相单元的控制策略没有说明。

本文首先系统地分析换相式不平衡负荷自动均衡控制系统的结构,设计换相控制流程及其换相策略;然后,详细说明基于复合式开关的换相单元的断路器和晶闸管的控制流程;最后,建立配变三相不平衡的仿真模型,验证了所提出的控制策略和控制流程的正确性。

1 换相式负荷自动均衡控制系统结构

配变三相不平衡负荷自动均衡控制系统方案如图1所示。通过主控单元采集变压器出口三相电流数据,分析变压器的三相不平衡度。如果计算三相不平衡度不满足要求,主控单元根据接收的分控单元采集的用户电压和电流数据,采用负荷自动均衡控制算法,计算出最佳的换相调整方案,下达指令给分控单元。分控单元控制换相单元的开关进行换相调整,最终调节至三相不平衡度满足要求。

其中,每个换相单元的输入接A、B、C三相线路和零线,输出一火线一零线接用户负载。通过换相单元调整各个用户负载接入的相别,使负载均衡地接到三相线路上。

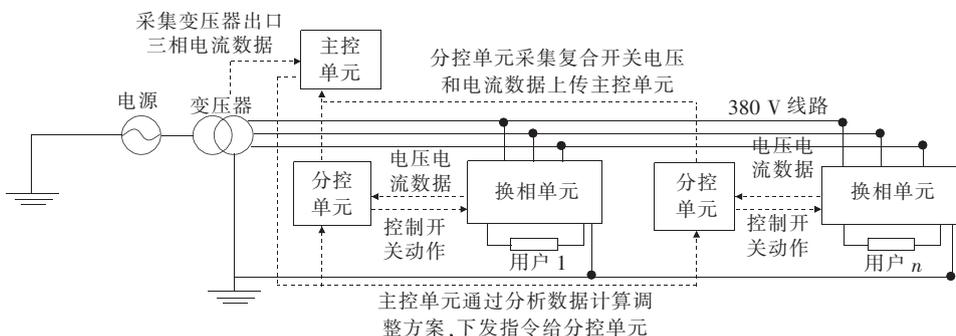


图1 配变换相式不平衡负荷自动均衡控制系统结构

Figure 1 Structure diagram of automatic balance control system for unbalanced load with phase transformation

2 换相式负荷自动均衡控制关键技术

2.1 换相式负荷自动均衡控制流程

配变三相不平衡负荷自动均衡控制在主控单元

中实现,控制流程如图2所示。首先,根据分控单元采集上传的各换相单元的电流,确定配电台区需要进行不平衡治理后,通过换相策略确定要调整的换相单元,将从开始计算换相策略到确定调整的换相单元的时间定义为换相的调整时间,将换相过程允

许的最长时间定义为设定时间。换相过程允许的最长时间需要考虑设备工作寿命和配电网相关规程规范的要求。允许的最长时间阈值设置大,不利于降低三相负荷不平衡带来的不利影响;阈值设置小,则会增加换相次数,增加开关损耗,降低开关寿命。以国家电网公司《配电网运维规程》为例,规定了需要进行不平衡治理的系统条件,即每天不平衡越限时间累计 1 h 为一个越限日,这给出了允许的最长时间阈值的上限为 1 h。如果调整时间超过设定时间,说明无论如何调整单相负荷,此时的配电台区三相负荷不平衡指标都无法达到设计要求。为了最大限度地降低三相负荷不平衡带来的不利影响,采用换相策略计算过程中三相负荷不平衡度较小的调整方案,作为不平衡度最小的动作方案,并进行换相调整。如果调整时间在设定时间内,则判断方案中要调整的换相单元对应的开关的动作次数是否越限,如果开关动作次数少于设定次数,则动作方案中相应的换相单元的开关;如果开关动作次数大于设定次数,为了避免开关反复动作影响其寿命,选择其他符合条件的换相单元动作。

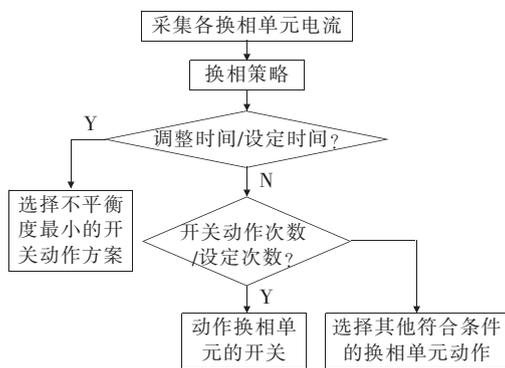


图 2 换相式不平衡负荷自动均衡控制

Figure 2 Block diagram of three-phase unbalanced load automatic balance control

2.2 换相策略

在换相式负荷自动均衡控制中,选择调整的换相开关需要考虑满足三相不平衡治理的要求以及减少开关动作的个数和次数。本文的换相策略是在一次换相操作只动作一个开关的前提下,选择能够最大限度地降低三相负荷不平衡度的换相开关作为需要调整的开关。换相式不平衡负荷自动均衡控制框图中的换相策略如图 3 所示。

首先设定三相负荷电流的平均值为目标值,分别计算各相的负荷电流之和与目标值之差 I_{adist} 、 I_{bdist} 、 I_{cdist} ;选取 I_{adist} 、 I_{bdist} 、 I_{cdist} 中最大值和最小值标记为 $I_{maxdist}$ 和 $I_{mindist}$,对应的相标记为 max 相和 min 相,标记另一相为 unchg 相;将 max 相中的各负载电流值分别与 $I_{mindist}$ 作差,选取最小的差值记为 I_{chg} ;判断如果多个 I_{chg} 满足条件,选取其中一个;最终选取一个满足条件的 I_{chg} ,通过其对应的换相开关将负荷从 max 相切换到 min 相;至此完成一次换相过程,更新各换相开关的电流数据;判断此时的三相不平衡度是否满足要求,如果不满足要求,继续按照上述换相过程再进行一次换相操作,如此循环,直到三相不平衡度满足要求为止,确定最终所有要调整的换相开关。

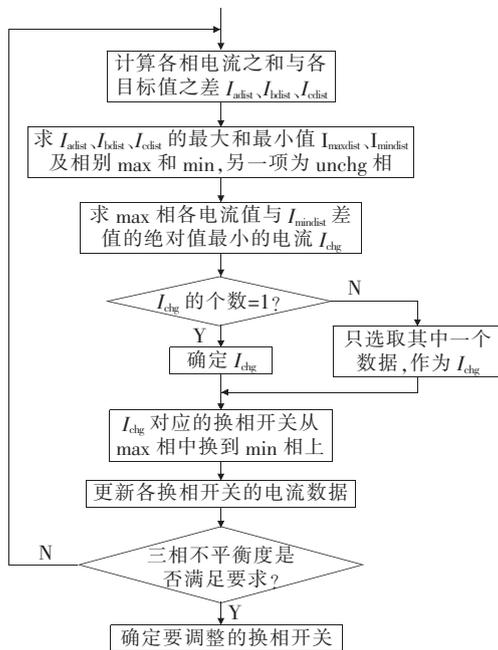


图 3 三相不平衡负荷换相策略流程

Figure 3 Diagram of commutation strategy on unbalanced three-phase loads

2.3 换相单元

2.3.1 换相单元结构

换相单元的开关有 2 种结构:机械式开关和复合式开关^[13-15]。采用机械式开关的换相单元结构如图 4 所示,采用复合式开关的换相单元结构如图 5 所示。机械式开关换相单元将单相负荷从一相换到另一相的过程中,会造成用户供电中断;复合式开关结构采用反并联晶闸管和机械开关结合的方式,

当接受到换相指令后,断开供电的断路器,同时触发其并联的晶闸管,然后根据负荷电流的方向和电压的相位,触发待切换相的晶闸管,通过两相之间的电压差,实现晶闸管的强迫换相,使负荷电流实现相间的转移,并避免了换相过程中供电中断。

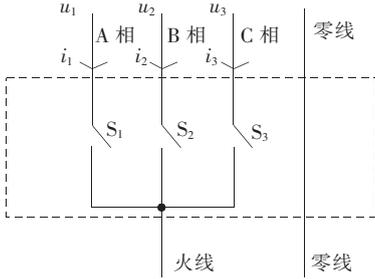


图4 基于机械式开关的换相单元

Figure 4 Commutation unit based on mechanical switch

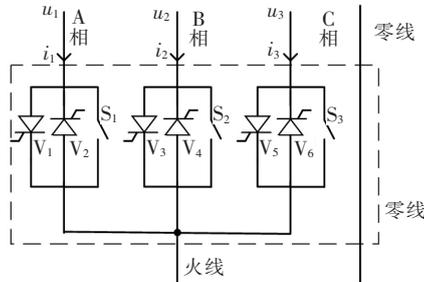


图5 基于复合式开关的换相单元

Figure 5 Commutation unit based on compound switch

2.3.2 复合式换相单元的动作控制流程

以图5中的换相开关从A相换到B相为例,基于复合式开关的换相单元的控制策略如图6所示。当换相单元接收到换相指令后,首先断开A相的断路器 S_1 ,触发A相的晶闸管 V_1 和 V_2 ;用户接入B相前,先判断A相的断路器电流是否为零,否则可能引起A、B两相环流;如果A相断路器电流为零,根据A相电流 i_1 的方向和 u_1 、 u_2 的大小选择动作B相的晶闸管和断路器,具体有以下几种工况。

1)换相时,如果 $i_1 > 0$, $u_1 > u_2$,由于此时 V_3 处于反向电压下,不能导通;此时如果触发 V_4 ,会形成环流。所以此时不触发 V_3 和 V_4 。

2)换相时,如果 $i_1 > 0$, $u_1 < u_2$,触发 V_3 ,同时撤销 V_1 和 V_2 的触发脉冲;检测 i_1 过零,触发 V_4 ;延时合上 S_2 ,撤销 V_4 的触发脉冲。

3)换相时,如果 $i_1 < 0$, $u_1 < u_2$,不触发 V_3 和 V_4 。

4)换相时,如果 $i_1 < 0$, $u_1 > u_2$,触发 V_4 ,同时撤销 V_1 和 V_2 的触发脉冲;检测 i_1 过零,触发 V_3 ;延时合上 S_2 ,撤销 V_3 的触发脉冲。

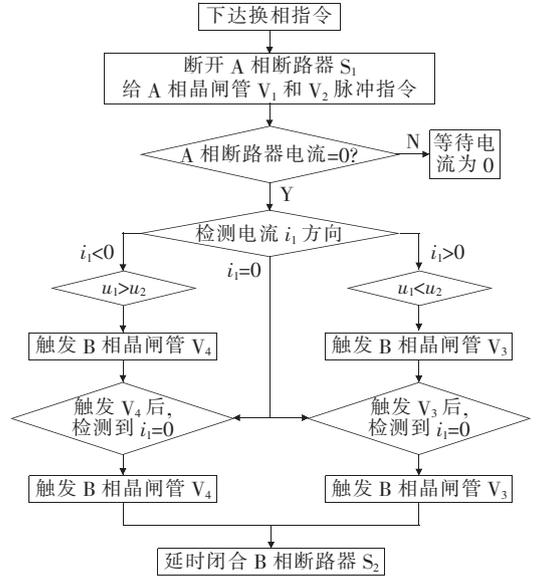


图6 基于复合式开关的换相单元动作控制流程

Figure 6 Action control flow of commutation unit based on compound switch

3 算例及仿真分析

为验证负荷自动均衡控制方法的正确性,建立表1的仿真模型,模拟配电网0.4 kV三相四线制系统的负载不平衡,模型中设置了15个用户,用户数据如表1所示。

换相前,三相各换相单元电流、三相总电流波形如图7~10所示,分别计算各相负荷电流之和,A相电流峰值为88.1 A,B相电流峰值为58.0 A,C相电流峰值为82.6 A。三相电流平均值为76.2 A。

本文采用的电流不平衡度计算方法为

$$I_{ubl} = \frac{|I_{max} - I_{ave}|}{I_{ave}} \times 100\% = 15.6\% \quad (1)$$

式中 I_{max} 为三相电流最大值; I_{ave} 为三相电流平均值。假定电流不平衡度的设计要求为不超过10%,即换相前电流不平衡度不符合设计要求。

三相电流和与平均值之差,记为A、B、C相电流差值,其值分别为11.9、-18.2、6.4 A。因此,将A相作为需调整相。

A 相用户 11 与 B 相差值之差绝对值最小,因此将用户 11 换到 B 相,换相后三相各换相电流、三相总电流波形如图 11~14 所示。由图 11~14 可知,

表 1 模型中的用户数据

Table 1 Data of loads in the model

用户编号	用户负载电阻值/ Ω	相序	负载电流峰值/A
1	20	A	16.33
2	40	B	8.16
3	30	A	10.89
4	15	A	21.77
5	50	C	6.53
6	40	B	8.16
7	22	C	14.84
8	36	B	9.07
9	30	C	10.89
10	16	C	20.41
11	50	A	6.53
12	10	B	32.66
13	40	C	8.16
14	10	A	32.66
15	15	C	21.77

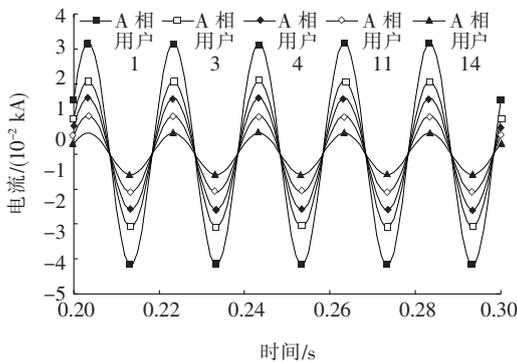


图 7 换相前 A 相各换相单元电流波形

Figure 7 Currents of Phase A before commutation

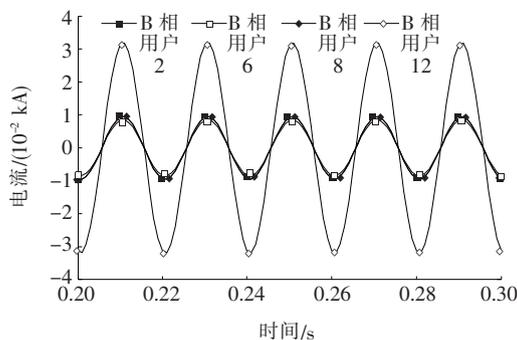


图 8 换相前 B 相各换相单元电流波形

Figure 8 Currents of phase B before commutation

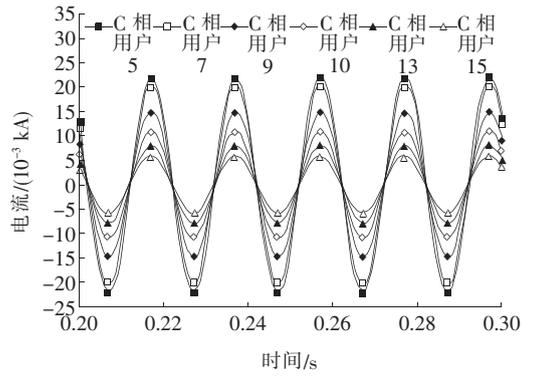


图 9 换相前 C 相各换相单元电流波形

Figure 9 Currents of phase C before commutation

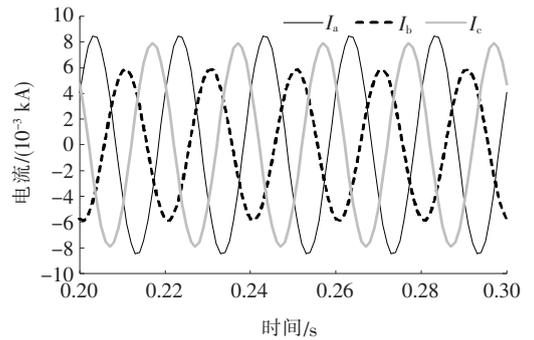


图 10 换相前三相电流波形

Figure 10 Three-phase currents before commutation

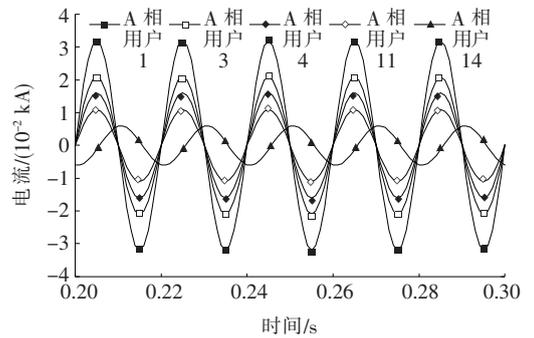


图 11 换相后 A 相各换相单元电流波形

Figure 11 Currents of phase A after commutation

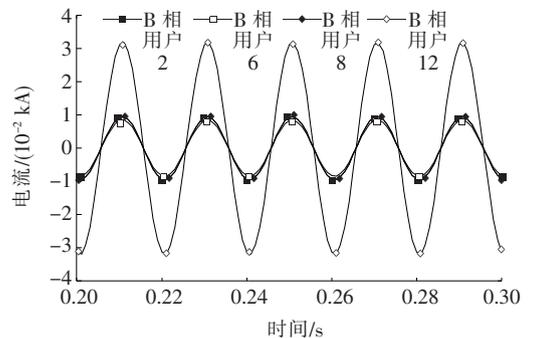


图 12 换相后 B 相各换相单元电流波形

Figure 12 Currents of phase B after commutation

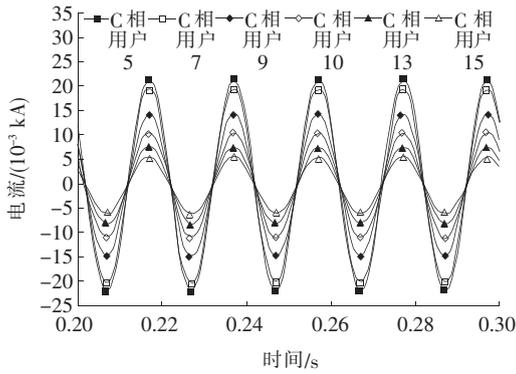


图 13 换相后 C 相各换相单元电流波形

Figure 13 Currents of phase C after commutation

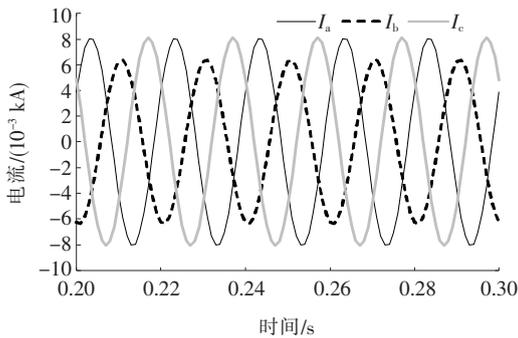


图 14 首次换相后三相电流

Figure 14 Three-phase currents after the first commutation

A 相电流峰值 81.5 A, B 相电流峰值 64.6 A, C 相电流峰值 82.6 A, 三相电流平均值为 76.2 A。换相后三相电流不平衡度计算值为 8%, 满足 10% 的设计要求。

通过负载自动平衡装置实现换相调整后, 减少了三相负荷不平衡度, 满足了设计要求。

4 结语

本文系统地分析了换相式不平衡负荷自动均衡控制系统的结构, 设计了换相控制流程及其换相策略, 并详细说明了基于复合式开关的换相单元的断路器和晶闸管的控制流程。本文建立仿真验证模型, 通过仿真结果和仿真运行数据计算不平衡度, 验证了所设计的换相控制流程及其换相策略能够明显改善负荷三相不平衡。本文提出的配变三相不平衡负荷自动均衡控制方法, 为工程中解决配变三相不平衡问题提供了方案参考和设计依据。

参考文献:

[1] 闫志强, 雷霞, 何建平, 等. 三相不平衡对配电变压器带负

载能力的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 51-57.

YAN Zhiqiang, LEI Xia, HE Jianping, et al. Study on the influence of three-phase unbalance on the load capacity of distribution transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 51-57.

[2] 李家靖, 严欣, 袁佳欣, 等. 三相不平衡条件下低压配电网合环操作研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 117-122.

LI Jiajing, YAN Xin, YUAN Jiabin, et al. Study on closed loop operation of low voltage distribution network under three-phase unbalanced condition [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 117-122.

[3] 姜淼, 李赫, 石勇, 等. 基于柔性电流源的三相不平衡电压补偿方法及应用[J]. 供用电, 2021, 38(2): 40-45.

JIANG Miao, LI He, SHI Yong, et al. Three-phase unbalanced voltage compensation method based on flexible current source and its application [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 40-45.

[4] 闫志强, 雷霞, 何建平, 等. 三相不平衡对配电变压器损耗影响的研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(16): 43-49.

YAN Zhiqiang, LEI Xia, HE Jianping, et al. Research on the influence of three-phase unbalance on the loss of distribution transformer [J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 43-49.

[5] 林志雄, 陈岩, 蔡金锭, 等. 低压配电网三相不平衡运行的影响及治理措施[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 63-67.

LIN Zhixiong, CHEN Yan, CAI Jinding, et al. Impact and countermeasure of three-phase unbalanced operation for low voltage distribution systems [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(3): 63-67.

[6] 魏梅芳, 胡毕正, 庞文龙, 等. 基于动态三相不平衡度的配电网线损计算方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 104-108.

WEI Meifang, HU Bizheng, PANG Wenlong, et al. Calculation method of distribution line loss based on dynamic three-phase unbalance degree [J]. Smart Power, 2020, 48(2): 104-108.

[7] 刘战磊, 曾祥君, 喻锴, 等. 基于不平衡过电压动态抑制的谐振接地配电网单相接地故障保护新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 41-49.

LIU Zhanlei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new

- method of single-phase grounding fault protection for a resonant grounding distribution network based on unbalanced overvoltage dynamic suppression[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 41-49.
- [8] 郭陆,温定筠,张广东,等. 750 kV 自耦变压器单相绕组对地电压不平衡的新型补偿方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 56-63.
- GUO Lu, WEN Dingyun, ZHANG Guangdong, et al. Study on a new compensation method for voltage imbalance between single-phase winding and ground of 750 kV autotransformer[J]. Power Grid and Clean Energy, 2021, 37(12): 56-63.
- [9] 李永霞,龚宇雷,郭修宵,等. 配网三相不平衡调节的换相算法[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 52-58.
- LI Yongxia, GONG Yulei, GUO Xiuxiao, et al. Commutation algorithm for three-phase unbalanced load regulation in distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 52-58.
- [10] 彭春华,陈首昆,于蓉. 基于模拟结晶算法的长效三相平衡优化换相策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3760-3767.
- PENG Chunhua, CHEN Shoukun, YU Rong. An optimal phase swapping strategy for long-term three-phase balancing using a novel simulated crystallizing algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3760-3767.
- [11] 王晴. 三相负荷不平衡调整开关及其应用[J]. 农村电气化, 2011(8): 5.
- WANG Qing. Three-phase load unbalance adjustment switch and its application[J]. Rural Electrification, 2011(8): 5.
- [12] 贾继莹. 三相负荷自动平衡器及其换相装置[P]. 中国: 201410078122. 2, 2014-05-14.
- [13] 张孝云,张洪波,刘鼎立,等. 换相技术在三相负荷不平衡治理中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 131-135+159.
- ZHANG Xiaoyun, ZHANG Hongbo, LIU Dingli, et al. Application research of commutation technology in unbalance treatment of three-phase load[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 131-135+159.
- [14] 李金元,赵国亮,赵波,等. 固态切换开关强迫切换策略研究[J]. 大功率变流技术, 2011(4): 49-52.
- LI Jinyuan, ZHAO Guoliang, ZHAO Bo, et al. Study of forced commutation strategy for solid state transfer switch[J]. High Power Converter Technology, 2011(4): 49-52.
- [15] 常栋梁,何立柱,李洋,等. 配电网功率平衡调节与无功补偿研究及装置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 132-138.
- CHANG Dongliang, HE Lizhu, LI Yang, et al. Research and device for the regulation of power balance and reactive power compensation in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(4): 132-138.