

# 基于无缝换相装置的三相负荷不平衡治理

曹磊, 胡鹏飞, 王蕊

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**三相负荷不平衡问题严重危害配电网的安全经济可靠运行。在此背景下,提出一种晶闸管无缝换相装置控制策略,实现三相负荷的均衡分配。首先,建立基于无缝换相装置的配电台区三相负荷不平衡治理系统的数学模型;基于该数学模型,采用向量基因遗传算法求解实现三相不平衡负荷治理,获得台区负载的最佳相别分配方案,通过仿真验证算法可行性;最后,在低压配电台区安装无缝换相装置,通过实验验证了该控制策略的正确性和可行性。

**关键词:**无缝换相装置;三相负荷不平衡;向量基因遗传算法;电能质量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.013 中图分类号:TM714 文章编号:1673-9140(2020)04-0099-08

## Research on three-phase load imbalance treatment based on the seamless commutation device

CAO Lei, HU Pengfei, WANG Rui

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The three-phase load imbalance seriously influences the safety, economic and reliable operation of distribution network. On this background, a control strategy of the SCR is proposed in this paper. Firstly, on the basis of the seamless commutation device, a mathematic model of three-phase load imbalance treatment system in distribution network is established. Then, the vector-genetic algorithm is utilized to realize the three-phase load imbalance treatment and the optimal phase allocation scheme of the distribution area is obtained. Finally, the feasibility of the algorithm is verified by the simulation. The seamless commutation devices are installed in the low voltage distribution area and the experimental results validate the correctness and feasibility of the proposed control scheme.

**Key words:** seamless commutation device; three-phase load imbalance; vector-genetic algorithm; power quality

在低压配网中,存在分布不平衡的单相负荷,致使很多配电台区出现三相负荷不平衡问题,给配电网的安全经济可靠运行带来了严重危害。三相负荷不平衡会给配电台区带来诸多危害<sup>[1-3]</sup>。目前,通常通过负荷补偿来减小三相负荷不平衡度,但该方法

能对配变自身问题稍加改善,无法实现全线路的负荷平衡,难以减小线损<sup>[4]</sup>。该文提出一种依靠无缝换相装置的三相负荷不平衡抑制方法,在线检测配变台区负荷的相别和电流信息,建立数学模型并应用向量基因遗传算法寻找最佳负荷相别分配方案。

依据最佳负荷相别分配方案,通过无缝换相装置调整负荷相别,从而实现三相负荷的均衡分配。

## 1 总体方案

基于无缝换相装置的三相负荷不平衡治理系统包括无缝换相装置和系统控制终端两大部分,如图1所示。

负荷通过无缝换相装置与配电网连接,无缝换

相装置具有检测负荷相别和负荷电流,并将该信息上传至系统控制终端的功能。系统控制终端安装在配电变压器出口侧,实时监测配电台区的负荷不平衡度,当不平衡度超出一定的阈值,其通过遗传算法寻找新的负荷分配方案并将控制指令下发至各个无缝换相装置。无缝换相装置根据控制指令完成负荷相序的重新分配,最终实现三相负荷的平衡。系统控制终端与无缝换相装置通过电力载波通讯的方式实现负荷信息的上传和控制指令的下发。

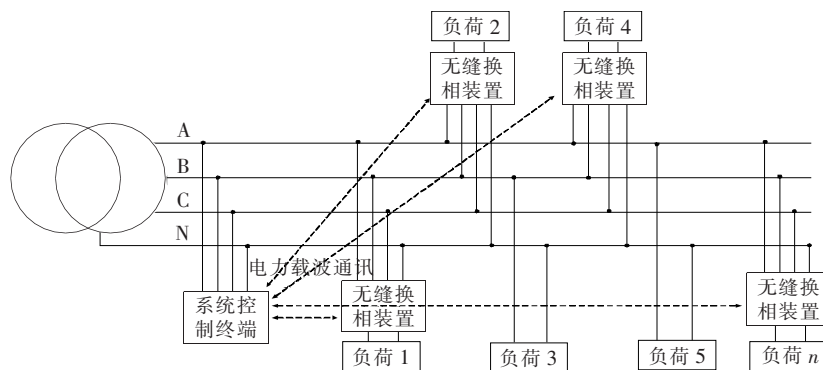


图1 三相负荷不平衡治理系统示意

Figure 1 Three-phase load imbalance treatment system

## 2 无缝换相装置

### 2.1 基于晶闸管的无缝换相拓扑结构及控制策略

对负荷进行在线相序调整,要求其对用电负荷尽量无冲击,不影响用户的供电质量。此外,还要求换相装置具备损耗小、成本低、可靠性高等特点。文献[5]中涉及一种自动转换开关,其中每一相的开关由一对反向串联的IGBT构成,其拓扑结构如图2所示,该转换开关可对负荷进行快速换相,但其成本较高、控制复杂,不适宜推广。

该文提出一种基于晶闸管的无缝换相控制策略

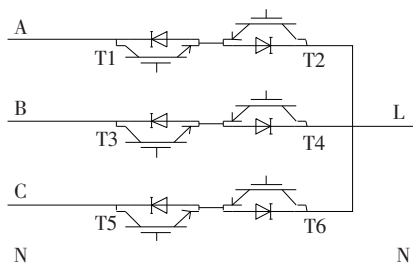


图2 基于IGBT的自动转换开关

Figure 2 Automatic converting switch based on IGBT

可实现0 ms换相,其拓扑结构如图3所示。文献[6]提出类似拓扑结构,但由于其反向并联的晶闸管不可独立控制,使得其必须确定一相晶闸管完全断开后再令另一相晶闸管导通,换相过程有2~3 ms的断电。图3中K1、K2、K3为机械开关,D1~D6为晶闸管,A、B、C、N分别为电网的三相线和中线,L、N分别为用户的火线和零线。每一相由反向并联的晶闸管再与一个机械开关并联构成。正常工作时6个晶闸管均为关断状态,三相中的两相机械开关为断开状态,只有一相机械开关处于闭合状态,为负荷供电。

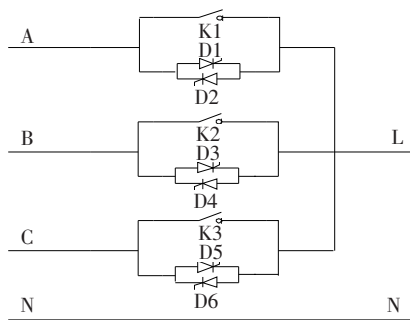


图3 基于晶闸管的无缝换相拓扑

Figure 3 Seamless commutation topology based on SCR

将负荷从 A 相切换到 B 相,对其工作过程及无缝换相控制策略进行说明,无缝换相装置的工作过程如图 4 所示。当正常运行时,机械开关 K1 为闭合状态,K2、K3 为断开状态,晶闸管 D1~D6 均为断开状态,负荷与 A 相相连,此时电流通路如图 4(a)所示。当装置收到需将负载从 A 相切换到 B 相的换相指令时,晶闸管 D1、D2 闭合,机械开关 K1 开断,负载通过晶闸管 D1、D2 与电网 A 相相连,此时电流通路如图 4(b)所示。当判断配电网 A 相电压为正半周期时,立刻关断晶闸管 D1、D2 的触发信号,由于晶闸管具有单相导电特性和特有的关断特性,故此时只有晶闸管 D2 处于通路状态,此时供电回路如图 4(c)所示。

三相电压波形如图 5 所示,当检测到 B 相电压大于 A 相电压时,即图 5 中  $t_2$  时刻之后( $t_3$  时刻之前)即给出晶闸管 D4 的触发信号。在晶闸管 D4 导通之前,晶闸管 D2 导通,晶闸管 D4 两端电压为线电压  $U_{BA}$ 。由于此时线电压  $U_{BA}$  大于零,晶闸管 D4 导通,晶闸管 D3 被强迫关断,此时供电回路如图 4(d)所示。当检测到 A 相电压小于零( $t_3$  时刻)时,此时给出晶闸管 D3 的触发信号以及机械开关 K2

的导通控制信号,由于机械开关动作有一定的延时(约一个周波),此时机械开关 K2 仍处于断开状态。当 B 相处于正半周期时,晶闸管 D4 导通,当 B 相处于负半周期时,晶闸管 D3 导通,负荷通过晶闸管 D3、D4 连接到电网 B 相,此时供电回路如图 4(e)所示。在确定机械开关 K2 闭合后,撤去晶闸管 D3、D4 的触发信号,晶闸管 D3、D4 处于断开状态,负荷通过机械开关 K2 与电网 B 相相连,电流回路如图 4(f)所示。此时换相装置已将负载从 A 相切换到 B 相。负载电压波形如图 6 所示。

当无缝换相装置将负荷从 B 相切换到 A 相时,其工作过程类似。在晶闸管完成换相时,要求在  $t_1$  时刻之后、 $t_2$  时刻之前,给出晶闸管 D2 的触发信号,完成晶闸管 D4 到晶闸管 D2 的强迫换相。负载电压波形如图 7 所示。

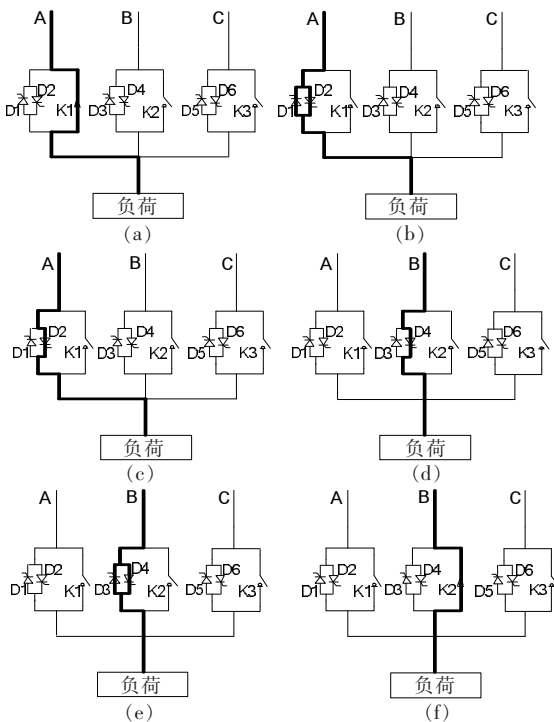


图 4 无缝换相装置的工作过程

Figure 4 The operating process of seamless commutation device

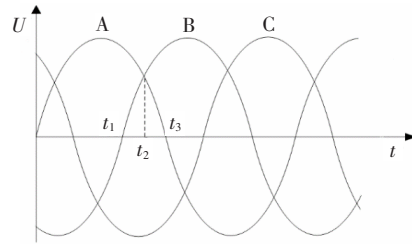


图 5 三相电压波形

Figure 5 Three-phase voltage waveform

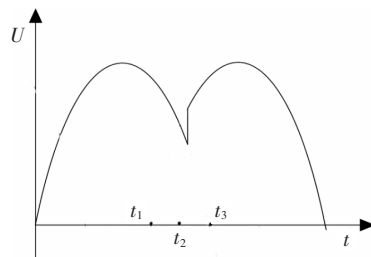


图 6 A 相切换到 B 相时的负载电压波形

Figure 6 Load voltage waveform of phase A switching to phase B

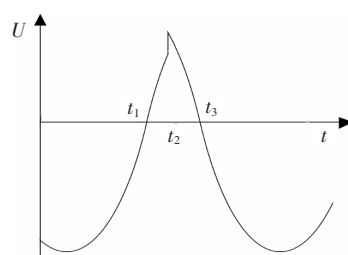


图 7 B 相切换到 A 相时的负载电压负载电压波形

Figure 7 Load voltage waveform of phase B switching to phase A

根据上述分析可知,无论是正序(A相换相到B相)还是负序(B相换相到A相)的换相,换相过程负荷不断电,实现了负荷的无缝换相,最大程度上降低了换相过程对负荷的冲击。无缝换相的关键是利用一相晶闸管导通从而使当前工作的晶闸管被强迫关断,从而实现负载换相,因此,换相过程需精确控制晶闸管触发信号的给出时间。无缝换相装置正常工作时只有一相机械开关处于闭合状态,机械开关的导通损耗小。换相过程由晶闸管辅助完成,机械开关的导通和闭合操作只承受晶闸管的导通压降,换相过程无需灭弧,延长了机械开关的电气寿命。除此之外,由于换相过程中每只晶闸管只导通2~3个周波,因此无需为晶闸管额外配置散热器,减小了装置体积。

## 2.2 无缝换相装置实验分析

无缝换相装置实验平台在相电压为220 V的三相四线制供电系统下进行,纯电阻负载为300 Ω、200 W。将负荷从A相切换到B相的负荷电压电流波形如图8所示,将负荷从B相切换到A相的负荷波形如图9所示,可以看出,正序和负序的负载切

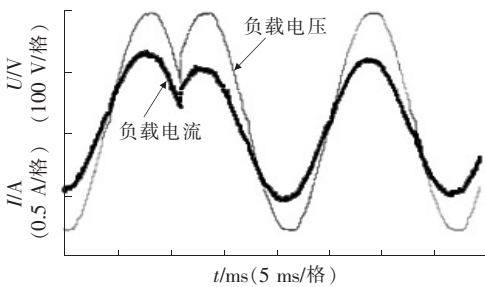


图8 负载电压、电流波形(A相切换至B相)

Figure 8 Load voltage and current waveform (phase A switching to phase B)

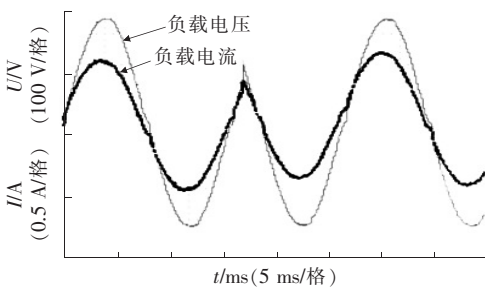


图9 负载电压、电流波形(B相切换至A相)

Figure 9 Load voltage and current waveform (phase B switching to phase A)

换均可实现无缝换相,换相过程为0 ms。对无缝换相装置进行多次负载换相实验,换相过程稳定可靠,验证了该文所提换相策略的可行性。

## 3 三相负荷平衡控制策略研究

### 3.1 三相负荷平衡系统的数学模型

通过调整负荷相序以抑制三相负荷不平衡的关键在于寻找最佳的负荷相别分配方案,该文建立的数学模型以负载不平衡度最小为目标函数。

配电变压器出口侧的电流分别为 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 。假设一个配变台区装有 $m$ 台无缝换相装置,每台装置的负荷电流分别为 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $\dots$ 、 $I_m$ ,可以用向量表示为 $\mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_m]^T$ 。

无缝换相装置具有三相开关,每一相开关只有导通和断开2种状态,并且同一时刻只能有一相开关处于导通状态,用开关函数 $s$ 表示其状态,即

$$s = \begin{cases} [1 \ 0 \ 0]^T, & \text{负载接到电网 A 相} \\ [0 \ 1 \ 0]^T, & \text{负载接到电网 B 相} \\ [0 \ 0 \ 1]^T, & \text{负载接到电网 C 相} \end{cases} \quad (1)$$

每台装置的开关函数分别为 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $\dots$ 、 $s_m$ ,则该配电台区所有换相装置的开关函数可以用向量表示为 $\mathbf{S} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_m]$ 。

配电台区中已安装和未安装换相装置的三相总电流分别为

$$[I_a \ I_b \ I_c]^T = \mathbf{S} \cdot \mathbf{I} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{b0} \\ I_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

记配电台区的总三相电流平均值为 $I_{av} = (I_A + I_B + I_C)/3$ 。配电台区的总电流最大相和最小相的电流之差为

$$I_{\Delta\max} = \max\{|I_A - I_B|, |I_B - I_C|, |I_C - I_A|\} \quad (4)$$

配变台区的三相负荷不平衡度可表示为

$$Un = \frac{I_{\Delta\max}}{I_{av}} \quad (5)$$

假设换相装置换相之后的开关函数为  $\mathbf{S}' = [s'_1 \ s'_2 \ \dots \ s'_m]$ , 则已安装换相装置的三相总电流为

$$[I'_a \ I'_b \ I'_c]^T = \mathbf{S}' \cdot \mathbf{I} \quad (6)$$

换相后总电流最大相和最小相的电流之差为

$$I'_{\Delta\max} =$$

$$\text{Max}\{ |(I'_a + I_{a0}) - (I'_b + I_{b0})|, |(I'_b + I_{b0}) - (I'_c + I_{c0})|, |(I'_c + I_{c0}) - (I'_a + I_{a0})| \} \quad (7)$$

换相后三相电流不平衡度记为

$$U'_n = \frac{I'_{\Delta\max}}{I_{av}} \quad (8)$$

由于换相前、后三相总电流平均值不变, 故  $I'_{\Delta\max}$  最小值对应于三相电流不平衡度最小值。因此, 配电台区三相负荷不平衡度最小目标函数可表示为

$$\epsilon = \text{Min}\{I'_{\Delta\max}(\mathbf{S}')\} \quad (9)$$

综上所述, 配电台区基于无缝换相装置的三相负荷平衡治理系统的数学模型可表示为

$$\epsilon = \text{Min}\{I'_{\Delta\max}(\mathbf{S}')\} \quad (10)$$

$$s'[1] + s'[2] + s'[3] = 1 \quad (11)$$

其中, 式(10)为目标函数, 式(11)为约束条件,  $s'[1]$ 、 $s'[2]$ 、 $s'[3]$  分别为开关函数的 3 项值。

### 3.2 模型求解方法

针对负载切换装置, 有专家提出采用不同算法<sup>[7-12]</sup>寻找负荷相别分配方案, 如: 粒子群、模拟结晶、专家系统、免疫、模拟退火、模糊 C 均值聚类等算法, 但这些算法主要用来解决多目标函数, 相对复杂。该文拟采用相对简单的向量基因遗传算法求解不平衡度抑制模型。

遗传算法是一种由自然选择和基因遗传学原理衍生出的随机并行搜索算法, 主要用来解决非线性优化问题<sup>[13-15]</sup>。

1) 种群初始化。

运用遗传算法求解模型需先通过编码把待求问题的可行解表示成遗传空间的染色体。无缝换相装置的每一相开关只有导通和断开 2 种状态, 且同一时刻只能有一相处于导通状态, 因此可以采用二进制编码。当换相装置 A、B、C 相开关均处于导通状

态时, 其基因可以分别表示为  $[1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 0 \ 1]^T$ 。确定单个装置的基因编码后即给装置编号, 并确定其在染色体中的顺序, 最后组合成染色体, 则配电台区所有换相装置的开关状态组合对应的染色体即为开关函数矩阵  $\mathbf{S}$ 。

2) 适应度函数。

适应度函数是用来衡量群体中个体好坏的标准, 该模型的适应度值为目标函数  $\epsilon$  最小值的倒数。适应度函数为

$$\text{Fit}(\epsilon(\mathbf{S}')) = \frac{1}{\epsilon(\mathbf{S}')} \quad (12)$$

3) 选择操作。

此过程从原有群体中以选择较好个体组建新的种群并得到新一代个体。该模型求解采用轮盘赌, 个体被选中的概率为

$$p_i = \frac{\text{Fit}_i}{\sum_{i=1}^m \text{Fit}_i} \quad (13)$$

式中  $\text{Fit}_i$  为染色体  $i$  的适应度值;  $m$  为种群染色体数目。

4) 交叉操作。

通过该算法可以生成 3 个随机数  $k$ 、 $l$ 、 $p$ 。当  $p > p_0$  时, 种群中染色体  $k$ 、 $l$  位置互换, 其中,  $1 \leq k \leq m$ ,  $1 \leq l \leq m$ ,  $k \neq l$ ,  $k$ 、 $l$  均为整数;  $0 \leq p \leq 1$ ;  $p_0$  为交叉概率。

5) 变异操作。

变异操作主要是为了保持种群多样性。由于装置的基因只能为  $[1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 0 \ 1]^T$  中的一种情况, 因此, 变异操作只能在此 3 种基因间进行变异。记  $[1 \ 0 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 、 $[0 \ 0 \ 1]^T$  为正向变异顺序,  $[0 \ 0 \ 1]^T$ 、 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 、 $[1 \ 0 \ 0]^T$  为负向变异顺序。每次变异操作随机选择变异顺序, 如: 若当前变异前的染色体为  $[0 \ 1 \ 0]^T$ , 变异顺序为负向变异, 则变异操作后的染色体为  $[0 \ 0 \ 1]^T$ 。

根据上述操作, 应用向量基因遗传算法求解三相负荷平衡系统的数学模型, 寻找最佳负荷相别分

配方案,并通过无缝换相装置进行换相,换相策略流程如图 10 所示。

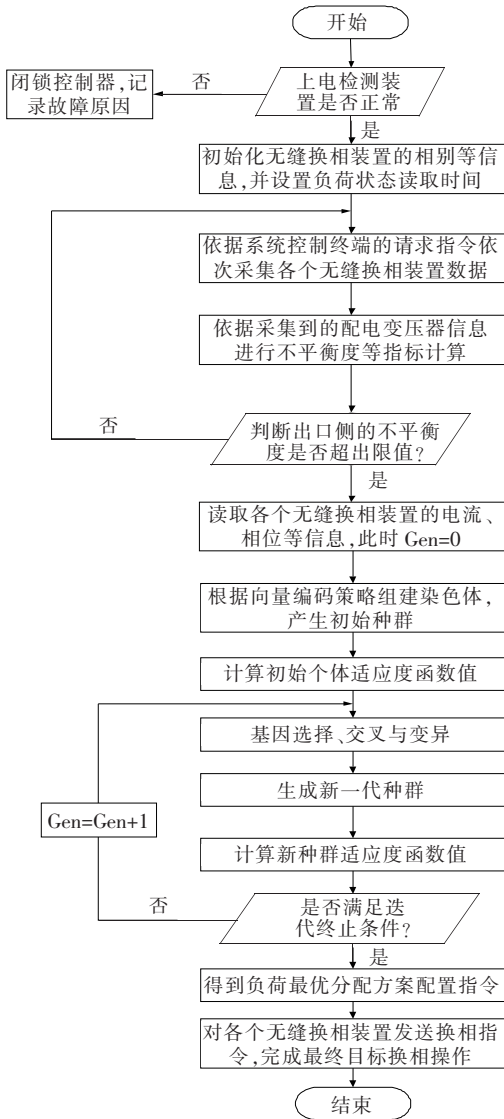


图 10 基于向量基因遗传算法的三相负荷不平衡治理流程

Figure 10 Flowchart of the three-phase load imbalance treatment based on vector-genetic algorithm

### 3.3 仿真算例分析

为了解决某农村配电台区三相负荷不平衡问题,对该村用户的电流及相别信息进行采集,具体数据<sup>[16]</sup>如表 1 所示。

根据表 1 可知,换相前无缝换相装置对应的开关函数矩阵为

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{S} = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

模型设定初始种群规模为 50,进化代数为 15,交叉概率为 0.6,变异概率为 0.01。优化后的各无缝换相开关对应的矩阵为

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{S}' = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

目标函数随迭代次数的变化情况如图 11 所示,表明通过 4 次迭代后目标函数收敛到最小值。三相电流随迭代次数的变化如图 12 所示,可知三相电流

表 1 某农村配电台区用户电流及相别信息

Table 1 The current and phase information of users in a rural distribution area

用户	电流/A	相别	用户	电流/A	相别
1	21.5	C	8	43.7	C
2	12.3	C	9	32.3	C
3	32.2	B	10	21.4	C
4	10.2	B	11	15.5	A
5	32.2	B	12	16.0	A
6	24.3	B	13	11.6	A
7	2.0	C			

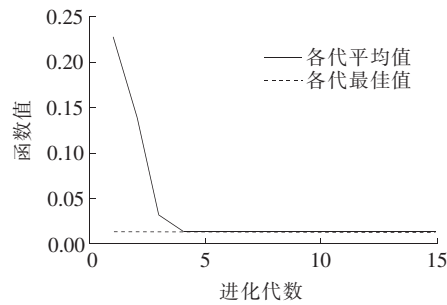


图 11 函数值随迭代次数的变化

Figure 11 The change of function value with the number of iterations

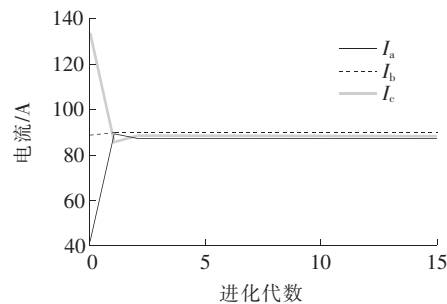


图 12 电流随迭代次数的变化

Figure 12 The change of current with the number of iterations

经过约4次迭代,最终达到平衡,各相电流约为88 A。

通过计算,经过相序调整,配电台区的三相电流不平衡度由调整前的102%降为调整后的2.3%,三相电流不平衡度由严重不平衡达到完全平衡状态。

### 3.4 并网实验分析

为了检查基于无缝换相装置的三相负荷不平衡实际治理效果,在某农村配电台区进行挂网实验。在供电单位用采系统中,将装置投入前、后电流的数据与波形进行对比。2015年8月3日三相电流曲线如图13(a)所示,2016年8月3日三相电流曲线如图13(b)所示。对比图13(a)、(b)可知,安装无缝换相装置后配电台区三相负荷不平衡情况得到了有效改善。

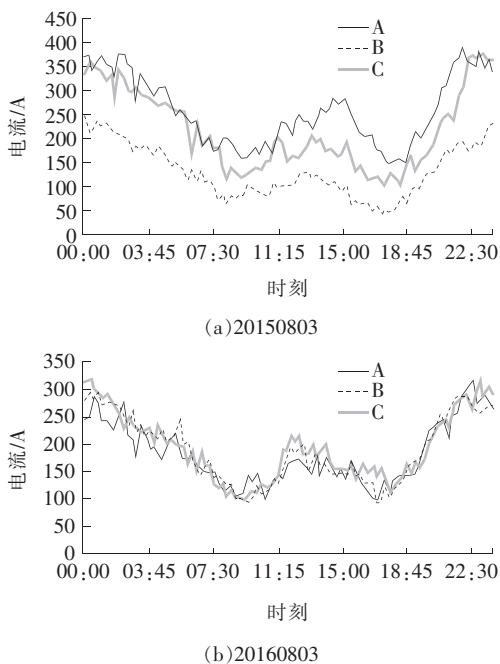


图13 三相电流曲线

Figure 13 Three-phase current curve

## 4 结语

1)通过无缝换相装置对负荷进行相序调整可有效解决三相负荷不平衡问题,为解决低压配网三相负荷不平衡问题提供了选择。

2)换相装置采用反向并联的晶闸管与机械开关并联的复合开关设计,减小装置损耗的同时降低了

装置成本。该文提出的无缝换相控制策略可实现负载的0 ms相别切换,最大程度上降低了换相过程对负荷的冲击。

3)应用向量基因遗传算法求解基于无缝换相装置的三相负荷平衡治理系统的数学模型,可找出负荷最优相别分配方案,同时向量基因遗传算法收敛快速稳定。

### 参考文献:

- [1] 郭兆成,车建涛,郭启栋,等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(21):86-95.
- [2] 曾祥君,李理,喻锐,等. 抑制配电网三相不平衡的柔性接地装置控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(3):19-28.
- [3] 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.
- [4] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2185-2193.
- [5] 陆惠斌,徐勇,伍宇翔,等. 基于换相技术的三相不平衡治理装置研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(6):64-69.

GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(21):86-95.

ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Research on control method of flexible grounding device for suppressing three-phase unbalance in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3):19-28.

LI Yongxia, GONG Yulei, GUO Xiuxiao, et al. Comutation algorithm for three-phase unbalanced load regulation in distribution network [J]. Electric Power, 2020,53(3):52-58.

FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9):2185-2193.

- LU Huibin, XU Yong, WU Yuxiang, et al. Study on three phase unbalance control device based on commutation technology[J]. Power Capacitor & Reactive Compensation, 2016, 37(6): 64-69.
- [6] 伍宇翔, 曹磊, 黄冠灵, 等. 基于晶闸管的快速切换装置研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(5): 39-42.
- WU Yuxiang, CAO Lei, Huang Guanling, et al. Research on quick switching switch based on thyristor[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(5): 39-42.
- [7] 张明, 谢珊珊, 罗云峰. 低压配电网三相负荷不平衡优化模型的研究[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 30(1): 59-62.
- ZHANG Ming, XIE Shanshan, LUO Yunfeng. Optimization model of the three-phase load imbalance in low voltage distribution network[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2015, 30(1): 59-62.
- [8] 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.
- [9] Lin C H, Chen C S, Chuang H J, et al. An expert system for three-phase balancing of distribution feeders [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1488-1496.
- [10] Huang M Y, Chen C S, Lin C H, et al. Three-phase balancing of distribution feeders using immune algorithm [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2008, 2(3): 383.
- [11] Fei Chunguo. Solving load phase balancing problem in LV distribution networks by chaotic simulated annealing [J]. Advanced Materials Research, 2012, (463-464): 689-693.
- [12] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [13] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [14] 李猛, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30-38.
- LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30-38.
- [15] 刘雪纯, 朱永利, 邓冉, 等. 考虑系统经济性和可靠性的机组组合模型及算法[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 8-14.
- LIU Xuechun, ZHU Yongli, DENG Ran, et al. Unit commitment model and algorithm considering system economy and reliability [J]. Smart Power, 2019, 47(7): 8-14.
- [16] 曹磊. 低压台区三相负荷不平衡治理与监控系统[D]. 南京: 东南大学, 2018.