

# 低压配网三相负荷不平衡危害研究

何奕枫<sup>1</sup>, 郭琳<sup>1</sup>, 黄鑫<sup>1</sup>, 李汉荣<sup>1</sup>, 王浩<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001;

2. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对现有的低压配网三相负荷不平衡危害分析评估指标不明确、治理措施效果单一的问题, 本文基于低压配网简化理论计算模型, 提出了三相负荷不平衡的评估方法, 选取电流不平衡度、配变负载率、低压网线损率、电压偏差和电压不平衡度等作为主要评估指标, 定量分析评估了不同条件下三相负荷不平衡对低压配网配变运行、功率损耗和电能质量的不良影响, 并在加强低压配网负荷管理的基础上, 在控制算法或系统结构上改进现有的低压配网三相负荷不平衡治理技术, 提出多目标优化自动换相开关和分布式协调控制 SVG 两种三相负荷不平衡调节装置, 并在 Matlab / Simulink 数字仿真软件下进行暂态电磁仿真实验。仿真结果表明, 基于协调控制 SVG 补偿系统, 配变低压端电流只含有十分小的零序分量及谐波分量, 说明补偿系统对三相不平衡负荷电流具有较好的补偿; 各接入点的电压, 由于补偿系统中部分 SVG 的逆向潮流, 对不平衡电流有效地吸收, 因此在接入点电压中未发现明显的相电压跌落, 证明了该实验装置的有效性。该研究可用于工程实际, 改进的治理技术可综合解决三相负荷不平衡导致的配变不平衡运行、线损、电压偏差、电压不平衡等问题。

**关键词:** 低压配网; 三相负荷不平衡; 配变运行; 功率损耗; 电能质量

**中图分类号:** TM76

**文献标识码:** A

由于低压配网中单相用户负荷特征较复杂、用电习惯差距较大、用电随机性强、用电同时率低等因素导致的三相负荷不平衡问题呈现长期性特征<sup>[1-3]</sup>。三相负荷不平衡可造成配电变压器处于不平衡运行状态、损耗增大、局部温升较大而缩短变压器使用寿命, 可造成低压线路中性点电位偏移导致部分用户电压偏低和低压线路损耗增大, 可造成用电设备不能正常工作等问题<sup>[3-6]</sup>。近年来, 国内外许多学者对低压台区三相负荷不平衡带来的电能质量问题进行了研究, 潘本仁等人<sup>[1-7]</sup>分别从定性分析和定量计算两方面展开了详细的讨论, 但未给出明确的三相负荷不平衡危害分析评估指标, 难以准确评估其危害程度以及为治理方案提供针对性的指导意见。围绕低压台区三相负荷不平衡的治理措施, 叶伟杰<sup>[2]</sup>提出智能化的自动换相装置取代传统的人工换相, 以提高换相的频次和节省人力运维成本; 潘志等人<sup>[8-12]</sup>提出使用无源的无功补偿装置(如: 分组投切电容器)对三相不平衡负荷电流进行补偿, 以较低的成本分级平衡负荷电流; T. A. Youssef 等人<sup>[13-20]</sup>提出使用有源的变流器(如: 有源滤波器、静止无功功率发生器等)对三相不平衡负荷电流进行补偿, 以无级、快速地平衡负荷电流。上述研究中, 对低压配网的三相负荷不平衡问题存在三相负荷不平衡危害评估指标不明确、治理效果单一的问题。因此, 本文基于低压配网简化模型, 明确了三相负荷不平衡危害的评估指标, 定量分析和评估不同条件下三相不平衡对低压配网台区配变运行、功率损耗、电能质量等方面的危害及影响, 并对现有的三相负荷不平衡治理措施进行改进, 提出针对性治理措施, 综合治理三相负荷不平衡导致的各种问题, 为开展低压配网三相不平衡整治工作提供参考与借鉴。

## 1 三相不平衡危害评估方法

### 1.1 低压配网建模

为便于在不同条件下对低压配网三相不平衡危害进行分析, 本文采用含有 5 个节点的低压配网台区模型, 低

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2014A030310191); 广东省省级科技计划项目(2014B040404002)

作者简介: 何奕枫(1982-), 男, 广东河源人, 工程师, 学士, 主要从事配电运行维护管理工作。

通讯作者: 王浩(1976-), 男, 广东兴宁人, 助理研究员, 博士, 主要从事配网电能质量治理技术研究。Email: whhao1@163.com

压配电网台区模型如图 1 所示。图 1 中,节点 1~3 分别处于低压线路  $T$  节点  $T_1 \sim T_3$  处,节点 4 和节点 5 分别处于 10 kV/0.4 kV 配电变压器的低压侧和高压侧。

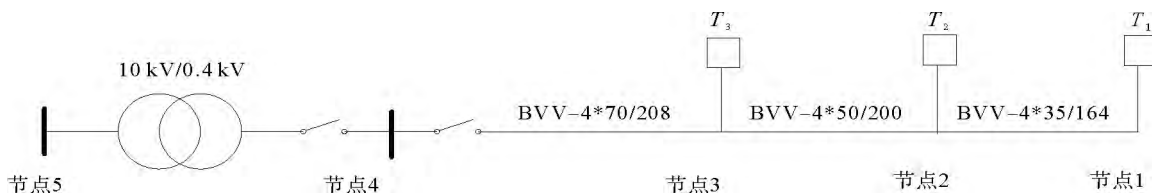


图 1 低压配电网台区模型

低压配电网台区等效模型如图 2 所示,该等效模型考虑了变压器等效阻抗,并将各节点间的线缆、负荷分别集总等效为节点 1~4 间的线路阻抗和节点 1~3 的三相负荷。

### 1.2 三相不平衡评估方法

本文侧重于定量分析评估三相不平衡负荷对低压台区配变运行、功率损耗、电能质量等方面的危害及影响,因此选取电流不平衡度、配变总负载率、单相负载率、台区线损率、0.4 kV 低压网线损率、电压偏差、电压不平衡度等运行指标作为三相不平衡影响主要评估对象。主要评估指标计算方法如下:

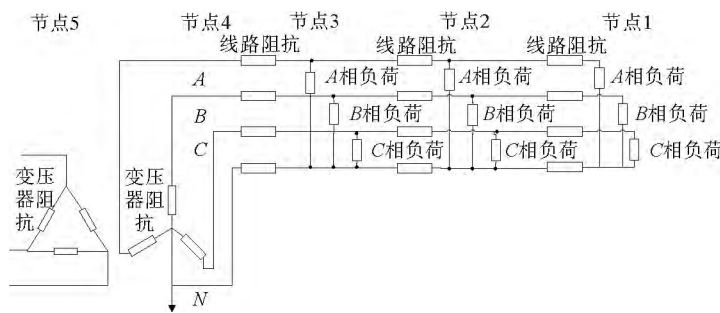


图 2 低压配电网台区等效模型

1) 电流不平衡度。配电台区电流不平衡度为相电流不平衡度,即台区低压线路首端最大相电流和最小相电流之差与最大相电流的比值。模型线路首端各相的电流计算为

$$\begin{cases} \vec{I}_a = \frac{\vec{V}_{4a} - \vec{V}_{3a}}{\vec{Z}_{L34}} \\ \vec{I}_b = \frac{\vec{V}_{4b} - \vec{V}_{3b}}{\vec{Z}_{L34}} \\ \vec{I}_c = \frac{\vec{V}_{4c} - \vec{V}_{3c}}{\vec{Z}_{L34}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\vec{I}_a$ 、 $\vec{I}_b$ 、 $\vec{I}_c$  分别表示 A、B、C 三相的线路首端电流;  $\vec{V}_{4a}$ 、 $\vec{V}_{4b}$ 、 $\vec{V}_{4c}$  分别表示节点 4 的三相电压;  $\vec{V}_{3a}$ 、 $\vec{V}_{3b}$ 、 $\vec{V}_{3c}$  分别表示节点 3 的三相电压;  $\vec{Z}_{L34}$  表示节点 3 到节点 4 之间的线路阻抗。

台区线路首端三相电流不平衡度为

$$dI = \frac{\max\{\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c\} - \min\{\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c\}}{\max\{\vec{I}_a, \vec{I}_b, \vec{I}_c\}} \quad (2)$$

式中,  $\max\{\}$  为计算三相电流最大有效值的函数;  $\min\{\}$  为计算三相电流最小有效值的函数。

2) 配变总负载率和单相负载率。配变总负载率为配变总视在功率与其额定容量的比值,配变单相负载率为单相视在功率与该相额定容量的比值。基于图 2 等效模型,变压器的视在功率为注入节点 5 的视在功率,故配变总负载率为

$$p_{l3} = \frac{\sqrt{(P_{5a} + P_{5b} + P_{5c})^2 + (Q_{5a} + Q_{5b} + Q_{5c})^2}}{S_{TN}} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $P_{5a}$ 、 $P_{5b}$ 、 $P_{5c}$  分别表示注入节点 5 的三相有功功率;  $Q_{5a}$ 、 $Q_{5b}$ 、 $Q_{5c}$  分别表示注入节点 5 的三相无功功率;  $S_{TN}$  表示配变额定容量。

配变单相负载率为

$$p_{lk} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{P_{5k}^2 + Q_{5k}^2}}{V_{TN} I_{TN}} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $V_{TN}$  表示配变单相额定电压;  $I_{TN}$  表示配变单相额定电流。

额定电流的计算方式为

$$I_{TN} = \frac{S_{TN}}{\sqrt{3}V_{TN}} \quad (5)$$

3) 台区线损率和 0.4 kV 低压网线损率。台区线损为注入台区的有功功率与负荷所消耗的有功功率的差值。在图 2 等效模型中, 注入台区的有功功率即为注入节点 5 的有功功率, 节点 5 的三相视在功率分别为

$$\begin{cases} \vec{S}_{5a} = \vec{V}_{5a} \frac{\vec{V}_{5a} - K \vec{V}_{4a}}{\vec{Z}_{L45}} \\ \vec{S}_{5b} = \vec{V}_{5b} \frac{\vec{V}_{5b} - K \vec{V}_{4b}}{\vec{Z}_{L45}} \\ \vec{S}_{5c} = \vec{V}_{5c} \frac{\vec{V}_{5c} - K \vec{V}_{4c}}{\vec{Z}_{L45}} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $S_{ik}$  为节点  $i$  的第  $k$  相注入功率;  $\vec{V}_{5k}$  表示节点 5 的第  $k$  相电压;  $K$  表示配电变压器变比;  $\vec{V}_{4k}$  表示节点 4 的第  $k$  相电压;  $\vec{Z}_{L45}$  表示折算后节点 4 到节点 5 之间的线路阻抗。

台区线损  $\Delta P_{Loss}$  为节点 5 的三相注入有功功率减去各个负荷的三相有功功率, 即

$$\Delta P_{Loss} = P_{5a} + P_{5b} + P_{5c} - \sum_{i=1}^3 (P_{lia} + P_{lib} + P_{lic}) \quad (7)$$

式中,  $P_{lik}$  为节点  $i$  的第  $k$  相负荷的有功功率。

台区线损率为台区线损与注入台区总有功功率的比值, 即

$$\Delta R_{PLoss} = \frac{P_{5a} + P_{5b} + P_{5c} - \sum_{i=1}^3 (P_{lia} + P_{lib} + P_{lic})}{P_{5a} + P_{5b} + P_{5c}} \times 100\% \quad (8)$$

0.4 kV 线损是指配变低压侧注入低压网的三相有功功率减去各个负荷的三相有功功率, 即

$$\Delta P_{Loss0.4kV} = P_{4a} + P_{4b} + P_{4c} - \sum_{i=1}^3 (P_{lia} + P_{lib} + P_{lic}) \quad (9)$$

式中,  $P_{4a}$ 、 $P_{4b}$ 、 $P_{4c}$  分别表示注入节点 4 的三相有功功率。

0.4 kV 低压网线损率为 0.4 kV 低压网线损与注入低压网的三相有功功率的比值, 即

$$\Delta R_{PLoss0.4kV} = \frac{P_{4a} + P_{4b} + P_{4c} - \sum_{i=1}^3 (P_{lia} + P_{lib} + P_{lic})}{P_{4a} + P_{4b} + P_{4c}} \times 100\% \quad (10)$$

4) 电压偏差、电压不平衡度。电压偏差是指实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值, 以百分数表示, 电压偏差计算公式为

$$\Delta V_{ik} = \frac{V_{ik} - V_N}{V_N} \times 100\% \quad (11)$$

式中,  $\Delta V_{ik}$  表示节点  $i$  的  $k$  相的电压偏差;  $V_{ik}$  表示节点  $i$  的  $k$  相的电压;  $V_N$  表示系统额定电压。

采用国家标准 GB/T15543—2008 计算三相电压不平衡度, 节点  $i$  的负序电压不平衡度为

$$\zeta_{u2} = \frac{U_{i2}}{U_{i1}} \times 100\% \quad (12)$$

式中,  $U_{i1}$  表示节点  $i$  的电压正序分量方均根值;  $U_{i2}$  表示节点  $i$  的电压负序分量方均根值;  $\zeta_{u2}$  表示国标下的负序电压不平衡度。

## 2 三相负荷不平衡危害分析评估

本文以低压配网台区为例进行三相负荷不平衡危害分析评估, 其中配变容量  $S_{TN} = 200 \text{ kV} \cdot \text{A}$ , 节点 5 电压为

10.3 kV,当节点 1~3 的负荷均三相平衡时,各节点负荷分布情况如表 1 所示。

考虑变压器阻抗、线路阻抗及各节点负荷情况,在 Matlab/Simulink 仿真平台下进行低压台区等效电路仿真实验,通过调整低压台区线路末端节点 1 的负荷大小,使线路首端电流不平衡度分别达到 15%,30%,50%,对该低压配网台区处于不同程度三相负荷不平衡下的配变负载水平、台区线损、电能质量等相关运行指标进行定量分析。

1) 对低压台区配变运行的影响。当线路首端电流不平衡度分别为 15%,30%,50%时,对配变的总负载率/单相负载率进行仿真,不同电流不平衡度时的配变总负载率和单相负载率如表 2 所示。由表 2 可以看出,三相平衡时,配变总负载率与 A、B、C 单相负载率为 68.48%;而随着电流不平衡度的增大,配变总负载率、重负荷相(A 相)负载率都明显增大,轻负荷相(C 相)负载率明显减小;而当馈线首端电流不平衡度达到 50%时,配变总负载率增加到 71.66%,重负荷相负载率则增加到 99.38%,虽然配变总负载率正常,但是重负荷相(A 相)已经接近过载,严重影响到配变的安全运行。

表 1 各节点负荷分布情况

节点编号	有功负荷/kW	无功负荷/kVar
1	24	14.88
2	75	46.48
3	4.35	2.67

表 2 不同电流不平衡度时的配变总负载率和单相负载率

电流不平衡度/%	配变总负载率/%	A 相负载率/%	B 相负载率/%	C 相负载率/%	电流不平衡度/%	配变总负载率/%	A 相负载率/%	B 相负载率/%	C 相负载率/%
0	68.48	68.48	68.48	68.48	30	69.18	81.66	68.85	57.16
15	68.64	73.71	69.58	62.63	50	71.66	99.38	66.72	49.67

2) 对低压台区功率损耗的影响。当线路首端电流不平衡度分别为 15%,30%,50%时,对台区总线损、线损率及 0.4 kV 网的线损和线损率进行仿真,不同电流不平衡度时的线损和线损率如表 3 所示。由表 3 可以看出,由于该低压配网线路供电距离较长,且台区较重负荷分布在线路中后段,台区线损偏高。当台区三相负荷平衡时,台区和 0.4 kV 低压网的线损率分别为 12.30%和 11.47%;而当馈线首端电流不平衡度达到 50%时,台区和 0.4 kV 低压网的线损率分别增至 16.77%和 15.87%。随着三相不平衡程度加剧,台区线损增加较为显著,将严重影响低压台区经济运行。

表 3 不同电流不平衡度时的线损和线损率

电流不平衡度/%	台区线损/kW	台区线损率/%	0.4 kV 网线损/kW	0.4 kV 网线损率/%	电流不平衡度/%	台区线损/kW	台区线损率/%	0.4 kV 网线损/kW	0.4 kV 网线损率/%
0	14.49	12.30	13.38	11.47	30	15.88	13.32	14.73	12.48
15	14.81	12.53	13.69	11.70	50	20.82	16.77	19.50	15.87

3) 对低压台区电能质量的影响。当线路首端电流不平衡度分别为 15%,30%,50%时,对各节点电压偏差进行仿真,不同电流不平衡度时的电压偏差如表 4 所示。由表 4 可以看出,当台区三相负荷平衡时,负荷节点 1~3 的电压偏差均在 -10%~+7%范围内,符合供电电压质量要求;当三相不平衡时,线路末端(负荷节点 1)的重负荷相(A 相)的电压偏差明显增大。

当台区首端电流不平衡度达 50%时,但线路末端 A 相电压偏差达 -13.6%,超电压偏差下限值,因三相负荷不平衡导致线路后端用户电压偏低,直接影响用户正常的生产生活用电。

当线路首端电流不平衡度分别为 15%,30%,50%时,对各节点电压不平衡度进行仿真,不同电流不平衡度时的电压不平衡度如表 5 所示。由表 5 可以看出,当台区三相负荷平衡时,节点 1~3 的电压不平衡度均为 0。随着三相负荷不平衡程度加剧,线路末端电压不平衡度明显增大。

当台区首端电流不平衡度达到 30%时,线路末端节点 1 的电压不平衡度可达 2.3%;当台区首端电流不平衡度达到 50%时,线路末端电压不平衡度可达 4.73%,严重超出国标规定的三相电压不平衡度允许范围(即正常电压不平衡度允许值为 2%,短时不得超过 4%)。

表4 不同电流不平衡度时的电压偏差

电流不平衡度/%	相序	电压偏差/%				电流不平衡度/%	相序	电压偏差/%			
		节点1	节点2	节点3	节点4			节点1	节点2	节点3	节点4
0	A相	-5.45	-3.87	1.66	5.97	30	A相	-8.94	-6.31	0.44	5.66
	B相	-5.45	-3.87	1.66	5.97		B相	-5.38	-3.83	1.62	5.87
	C相	-5.45	-3.87	1.66	5.97		C相	-2.60	-1.86	2.73	6.32
15	A相	-6.76	-4.80	1.17	5.81	50	A相	-13.61	-9.58	-1.16	5.31
	B相	-5.63	-4.03	1.55	5.90		B相	-4.74	-3.31	1.83	5.85
	C相	-4.09	-2.86	2.22	6.18		C相	-0.58	-0.48	3.43	6.52

表5 不同电流不平衡度时的电压不平衡度

电流不平衡度/%	电压不平衡度/%				电流不平衡度/%	电压不平衡度/%			
	节点1	节点2	节点3	节点4		节点1	节点2	节点3	节点4
0	0	0	0	0	30	2.30	1.63	0.80	0.35
15	1.01	0.71	0.35	0.15	50	4.73	3.34	1.65	0.71

根据上述对不同条件下低压配网三相不平衡影响主要评估指标的理论测算结果,可知三相负荷不平衡对低压配网安全经济运行带来的危害如下:

- 1) 变压器处于不平衡运行状态,导致变压器损耗增大,重负荷相也存在长时间过载运行的危险。
- 2) 低压线路损耗增加,当负荷不平衡度严重、负载率高时尤为显著,严重影响低压配网经济运行。
- 3) 导致各负荷节点电压偏差和电压不平衡,负荷不平衡度严重、负载率高时可导致线路后端用户电压偏低,直接影响用户正常的生产生活用电;负荷节点电压不平衡度较高时,所含的负序电压分量严重超标,可造成电机输出功率明显减少和电动机效率降低等不良影响。

### 3 三相不平衡主要治理措施

目前主要通过加强台区负荷管理及采用人工调整换相方式进行低压三相负荷不平衡治理<sup>[1,4]</sup>。近年来,随着三相不平衡治理技术的发展,部分地区试点应用自动换相器<sup>[1]</sup>、三相不平衡补偿器<sup>[5-10]</sup>等调节装置,以实现低压配网三相负荷的动态平衡。上述治理措施治理效果较单一,本文对现有的自动换相器和三相不平衡补偿器这两种治理措施进行改进,提出应结合具体低压台区的三相负荷不平衡问题定量分析和评估结果,在加强管理的基础上,应用改进型三相不平衡自动调节装置,实现对综合解决三相负荷不平衡导致的配变不平衡运行、线损、电压偏差、电压不平衡等问题的多目标改善效果。

#### 3.1 加强台区负荷管理

在配变台区规划设计环节,应严格审查用户申报资料,做好用户数量、负荷大小、负荷性质等统计分析工作,根据调研资料和数据,确定配变台区的布局位置和出线方式;建立负荷相序分配表,将各类用电性质的用户按照负荷大小均匀分配,从源头上抑制配电变压器三相不平衡。

在配变台区日常运维环节,应加强配变三相不平衡监测和相序调整工作,针对运行中三相不平衡超标的配变,定期开展人工换相工作,配变负荷在线监测数据应包含多个时刻的负荷数据,选取的监测时刻应具有代表性,反映出用户的负荷特征,通过对负荷数据进行优化决策计算,获得最佳换相调整方案。

#### 3.2 改进型三相不平衡治理技术

1) 多目标优化自动换相器。自动换相器由主控制器和自动切换单元组成,其中主控制器根据采集到的台区线路首端三相电流、出线端接入的相序和用户负荷情况确定换相方案,自动切换单元响应主控制器,实现出线端相序的切换。现有自动换相器多以改善配变三相电流不平衡为目标获取换相方案<sup>[1]</sup>,对因三相负荷电流不平衡导致的低压线路电能损耗、电压偏差、电压不平衡等问题并未优化。

为改进现有自动换相器的不足,考虑自动换相器实时性要求不高(分钟级的响应时间,且因开关寿命问题不

可频繁切换),本文提出综合解决多个问题的多目标优化自动换相器,多目标优化自动换相器算法示意图如图 3 所示。该算法的主要控制思路是:在通过系统自检测正常后,读入所需数据,在换相开关本控制周期的换相次数未超标时,计算并判断三相负荷不平衡带来几种问题,并以解决各种问题且裕量最优为目标,采用智能算法(如:多目标遗传算法)选取最佳换相方案,针对改善配变三相电流不平衡、线损、电压偏差、电压不平衡等问题,实现多目标优化。对于负荷分布较集中、须同时解决因三相负荷不平衡导致多种问题的配变台区,可采用多目标优化自动换相器。

2) 分布式协调控制 SVG。静止无功发生器(static var generator, SVG)是有源三相负荷不平衡补偿装置,采用电力电子开关器件,具有远远高于无源补偿装置的调节速度和开关寿命,解决低压台区三相负荷不平衡带来的各种电能质量问题效果最佳。现有的方案多是采用集中式接入方法在低压台区线路首端接入 SVG。因为 SVG 只能补偿其并联接入点上游线路的不平衡电流、线损和上游节点低电压,故采用集中式接入方法在线路首端接入 SVG 不能同时兼顾平衡三相负荷电流、减少线损和消除节点低电压。为综合解决配变三相电流不平衡、线损、电压偏差、电压不平衡等问题,本文提出了分布式协调控制 SVG 补偿系统,基于协调控制 SVG 补偿系统结构图如图 4 所示。

由图 4 可以看出,SVG 补偿系统采用分布式接入方式,在低压台区多个节点分别接入 SVG,则可在平衡各节点三相负荷电流的同时,进一步减少线损、消除节点电压偏差、电压不平衡。在采用分布式接入 SVG 补偿系统基础上,增加 SVG 之间通讯线,并提出 SVG 协调控制方法。协调控制方法如图 5 所示。

基于该协调控制方法,下游 SVG 可利用其补偿下游不平衡负荷后的剩余容量,根据上游 SVG 不足容量值及距离,依次对上游 SVG 进行补偿。该含通讯线的分布式接入 SVG 补偿系统,可充分利用各 SVG 的容量。同时,下游 SVG 对上游 SVG 不足容量的补偿形成逆向潮流,可进一步减轻各节点的电压偏差、电压不平衡问题。当台区负荷较分散、用户负荷特征较复杂、须同时解决多种三相负荷不平衡导致问题时,可采用三相不平衡补偿器。

为验证所提出的补偿系统及控制策略的准确性,设计试验条件如下:采用含 4 个协调控制 SVG 的补偿系统,结构参考图 4;配变低压端电压有效值为 400 V;除负荷 #2 外的其它 3 个负荷为零,负荷 #2 为电流源,其中所含的负序分量有效值 400 A,零序分量有效值为 200 A;4 个 SVG 分别并联接入到接入点 #1~#4。

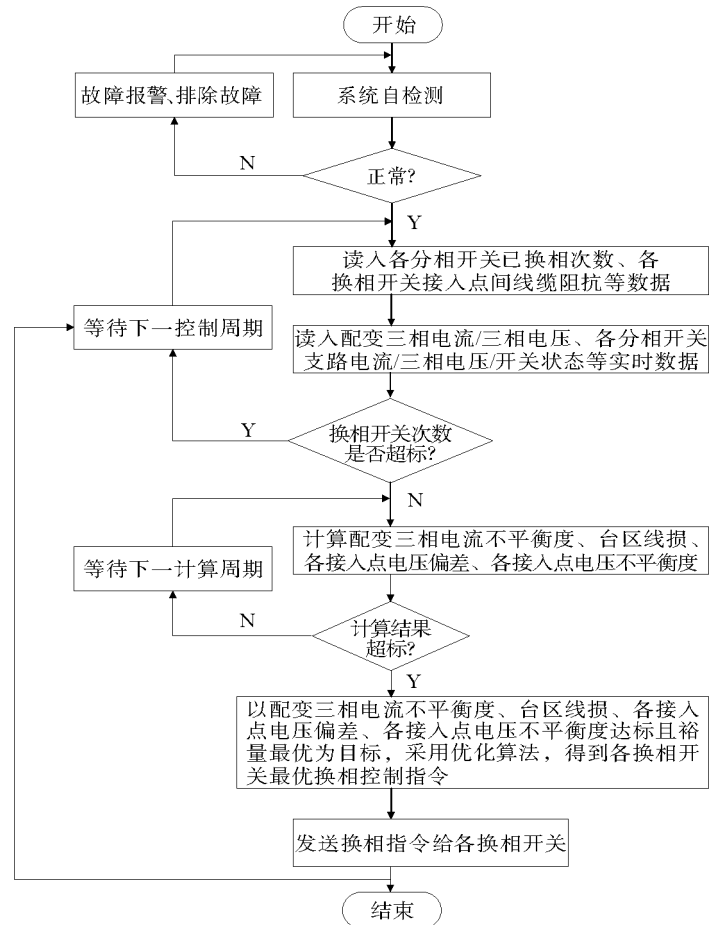


图 3 多目标优化自动换相器算法示意图

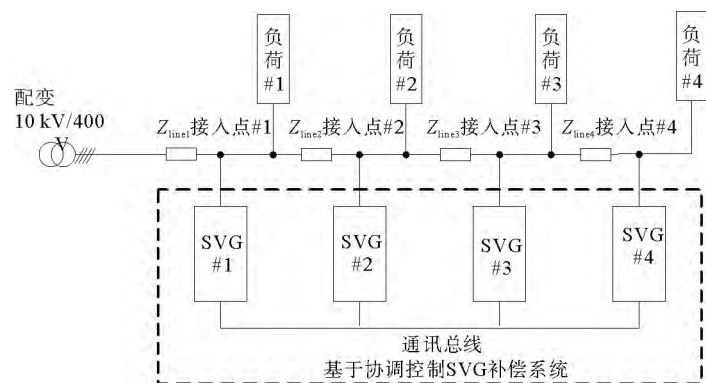


图 4 基于协调控制 SVG 补偿系统结构图

采用本文提出的协调控制策略,最大补偿电流有效值为 150 A;各接入点之间的线路阻抗值相等,为  $0.025 \Omega$ 。在 Matlab / Simulink 数字仿真软件下进行暂态电磁仿真实验,基于协调控制 SVG 仿真波形如图 6 所示。

图 6a 包括负荷 #2 电流及配变低压端电压、电流波形,其中负荷 #2 电流的不平衡分量较大,基于协调控制 SVG 补偿系统,配变低压端电流只含较小的零序分量及谐波分量。由此可知,补偿系统对三相不平衡负荷电流具有较好的补偿。图 6b 为各接入点的电压,本可能产生最大 30 V 相电压跌落(A 相 600 A 电流在两个  $0.025 \Omega$  线路阻抗上的压降),由于补偿系统中部分 SVG 的逆向潮流,对不平衡电流有效地吸收,因此在接入点电压中未发现该明显的相电压跌落。

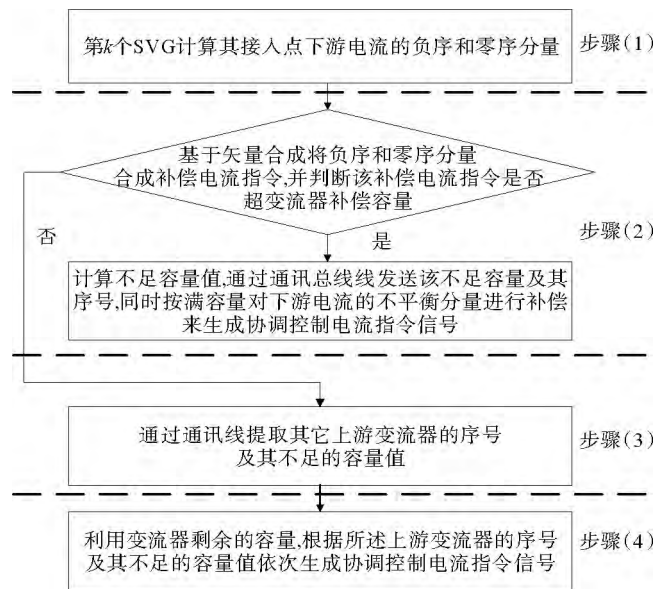


图 5 协调控制方法

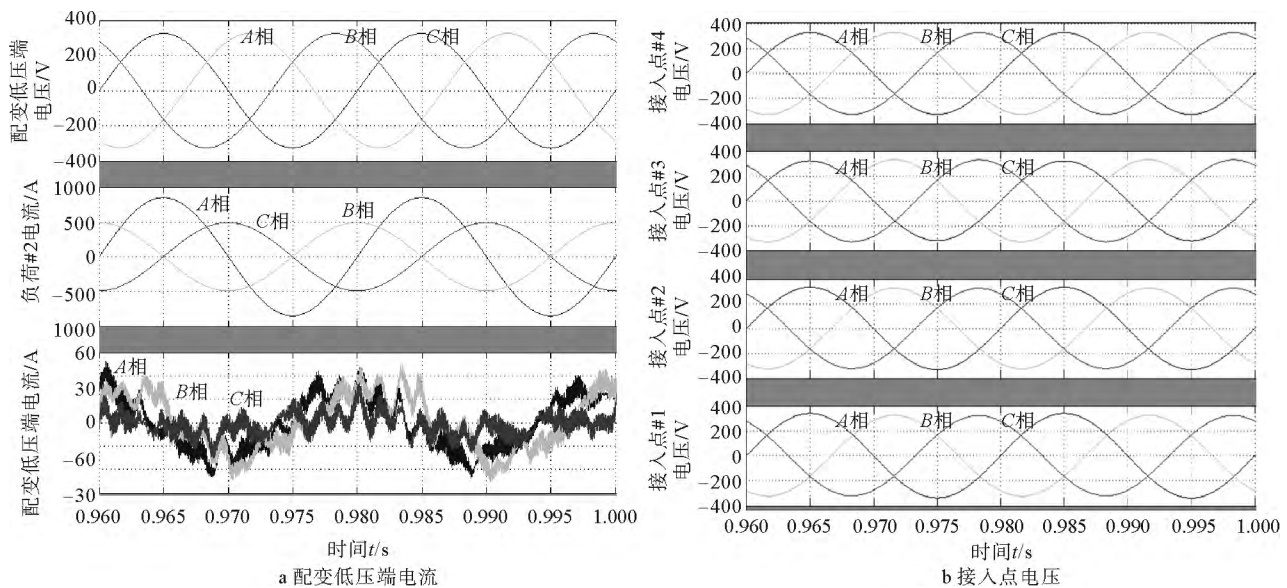


图 6 基于协调控制 SVG 仿真波形

### 4 结束语

本文提出低压台区三相负荷不平衡危害评估方法,基于 Matlab/Simulink 仿真,通过电流不平衡度、配变负载率、低压网线损率、电压偏差、电压不平衡度等主要评估指标,定量分析了额定容量为  $200 \text{ kV} \cdot \text{A}$  的低压配电台区在负荷电流不平度分别达到 15%, 30%, 50% 时,对配变运行、功率损耗和电能质量的不良影响。同时,对三相负荷不平衡治理措施的治理效果较单一的情况,本文对现有的自动换相器和三相不平衡补偿器这两种治理措施进行改进,提出应结合具体低压台区的三相负荷不平衡问题定量分析和评估结果。在加强管理的基础上,应用改进型三相不平衡自动调节装置,实现对综合解决三相负荷不平衡导致的配变不平衡运行、线损、电压偏差、电压不平衡等问题的多目标改善效果。本文所提的评估方法和治理措施,可较全面地分析低压台区的三相负荷不平衡危害情况,为技术人员选择针对性的治理措施提供理论依据。结合具体的试点应用情况,细化评估方法和治理措施在不同情况下的低压台区中的具体应用条件,以提高本文所提的评估方法和治理措施的适用性,是本研究下一步需要解决的问题。

### 参考文献:

[1] 潘本仁, 余佩胜, 陈首昆, 等. 配电变压器三相不平衡分析及研究综述[J]. 江西电力, 2012, 36(5): 63-65.

- [2] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [3] 蒋浩, 王淼. 三相负荷不平衡对低压网损影响的分析[J]. 供用电, 2008, 25(3): 68-70.
- [4] 秦春霞, 高自军, 郑帆. 浅谈低压电网三相不平衡问题[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 24(3): 18-20.
- [5] 敖然, 吕会军, 王剑, 等. 配网三相不平衡补偿分析[J]. 华北电力技术, 2013(5): 54-57.
- [6] Njafi A, Iskender I, Genc N. Evaluating and Derating of Three-Phase Distribution Transformer under Unbalanced Voltage and Unbalance Load Using Finite Element Method [C]// Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International. Langkawi, Malaysia; IEEE Press, 2014; 160-165.
- [7] Bachry A, Styczynski Z A. An Analysis of Distribution System Power Quality Problems Resulting from Load Unbalance and Harmonics [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition 2003 IEEE PES. Dallas, TX, USA; IEEE Press, 2003; 763-766.
- [8] 潘志, 李湘华, 陈岳, 等. 三相不平衡负荷的管理和降损技术研究[J]. 电力学报, 2012, 27(2): 127-131.
- [9] Yeganehfar S, Ebadian M, Tabatabaee S H. Presents A New Topology for Parallel Compensator to Improve the Load Unbalance in Electrical Energy Distribution Network[C]// Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), 2015 20th Conference on, Zahedan. Iran; IEEE Press, 2015; 246-253.
- [10] Arunprasanth S, Arulampalam A, Binduhewa P J, et al. Dynamic Reactive Power Compensator (DRPC) for Unbalance Load Reactive Power Compensation [C]// 2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems, Peradeniya, Sri Lanka; IEEE Press, 2013; 531-536.
- [11] Vicente L M, Joaquin M R, Jose M P. Passive Unbalance Compensation Device for Three-Phase Variable Loads [C]//2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). ROME, Italy; IEEE Press, 2011; 1-4.
- [12] Pana A, Baloi A, Molnar-Matei F. Load Balancing by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation-A Numerical Approach [C]// Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power ( ICHQP). Bergamo, Italy; IEEE Press, 2010; 1-6.
- [13] Youssef T A, Elsayed A T, Berzoy A, et al. Power Quality Enhancement for Nonlinear Unbalanced Loads Through Improved Active Power Filter Control [C]// IECON 2014 - 40 th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, TX, USA; IEEE Press, 2014; 5202-5207.
- [14] Karvekar S, Patil D. A novel Technique for Implementation of Shunt Active Power Filter UnderBalanced and Unbalanced Load Conditions Circuits [C]// 2013 International Conference on Power and Computing Technologies (ICCPCT). Nagercoil, India; IEEE Press, 2013; 1-5.
- [15] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
- [16] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器多目标协调控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 148-157.
- [17] Zhang S, Luo F L. A novel Control Strategy for Load Converter of Renewable Energy Under Unbalanced Loading[C]// 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore; IEEE Press, 2012; 1506-1511.
- [18] 阳同光, 桂卫华. 电网不平衡情况下并网逆变器控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 241-246.
- [19] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 257-265.
- [20] 鞠洪兵, 王德涛, 张金斗. 角形链式 SVG 补偿不平衡负载的控制策略[J]. 电气技术, 2014(S1): 18-23.

## 作者与作者单位英译

- 1) 作者: 中国人名按汉语拼音拼写; 其他非英语国家人名按作者自己提供的罗马字母拼法拼写。
- 2) 单位: 单位名称要写全(由小到大), 并附地址和邮政编码, 确保联系方便。另外, 英译单位不能采取缩写, 且一定要采用本单位统一的译法, 切不可随意改写。

## 英文文献的书写格式

英文文献的书写格式和中文相同。文献中的作者, 1~3 名全部列出, 3 名以上只列前 3 名, 后加“等”, 英文文献加“et al”。

英文姓名书写格式: 姓在前, 名(缩写)在后, 不加缩略点。



# Hazard Analysis and Control of Three-Phase Load Unbalance in Low Voltage Distribution Networks

HE Yifeng, GUO Lin, HUANG Xin, LI Hanrong, WANG Hao

- (1. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Huizhou, 516001, China;
2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In the low voltage distribution networks, existing hazard analysis evaluation indexes of three-phase load unbalance are undefined and existing control methods of three-phase load unbalance have single effect. Aiming at this problem, based on the simplified low voltage distribution networks calculation model, evaluation method of three-phase load unbalance problem is proposed. Current unbalance rate, load ratio of distribution transformer, line loss rate of low voltage distribution networks, voltage deviation and voltage unbalance rate are selected as the main evaluation indexes. Based on these indexes, quantitative analysis and evaluation of negative influence on the distribution transformer operation, power loss and power quality in low voltage distribution networks are carried out under different levels of three-phase unbalance load. Based on strengthening the daily load management of low voltage distribution networks, improvement of existing control methods are made in the control strategy or system structure. Automatic commutation switch with multi-objective optimization algorithm and distributed SVGs with coordinated control strategy are proposed. Electromagnetic transient simulations in Matlab/Simulink are carried out. Two points are illustrated from the simulation results. At the first point, based on the compensation system of coordinated controlled SVGs, low voltage side current of distribution transformer only contains very small zero-sequence component and harmonic component, which shows the compensation system has good compensation effect on the three-phase unbalance load current. At the second point, because the backward power flow of partial SVGs can effectively absorb the unbalance current, no apparent phase voltage drops are appeared at the access points, and this proves the validity of the proposed control methods. This research can be applied in practical engineering. The improved control methods can comprehensively solve the three-phase load unbalance problems, and this include unbalance operation of distribution transformer, line loss, voltage deviation, voltage unbalance, etc.

**Key words:** low voltage distribution networks; three-phase load unbalance; distribution transformer operation; power loss; power quality

## 科技论文的定义

科技论文是由科技工作者对其创造性研究成果进行理论分析和科学总结,并得以公开发表或通过答辩的科技写作文体。一篇完备的科技论文,应该按一定的格式书写,具有科学性、首创性和逻辑性;还应按一定的方式发表,即有效出版。

## 科技期刊中的标点符号 punctuation

辅助文字记录语言的符号,是书面语的有机组成部分,用来表示语句的停顿、语气以及标示某些成分(主要是词语)的特定性质和作用。

注:数学符号、货币符号、校勘符号、辞书符号、注音符号等特殊领域的专门符号不是标点符号。