

基于序分量的台区低电压机理分析

通过采集低压台区实际运行数据，基于序分量分析对台区低电压问题的机理进行研究，分析了配电变压器和供电线路的正序电压、负序电压和零序电压降对台区低电压的影响程度，确定造成台区低电压的根本原因。在此基础之上，对低压台区配网进行建模仿真，通过实测数据验证仿真模型的正确性，电压序分量对台区低电压的影响程度进行仿真，为科学选取台区低电压治理方案提供一定的理论借鉴。

崔屹平 马智远/广州供电局有限公司

朱明星 孙 贺/安徽大学教育部电能质量工程研究中心



崔屹平/工程师

0 引言

电压合格率是反映供电服务水平的重要指标，由于历史原因和现实难题，电压质量问题成为城乡、农村地区用户投诉较多的一类问题。从近年来各地投诉问题来看，客户对于电压质量的投诉事件时有发生，主要表现在电压偏低、电压不稳及电压偏高三类。分析低压台区现状，导致电压偏低的三大主要原因是低压主干线线径过小、低压线路供电半径过长、配电变压器重载或过载，累计占比达84.37%。

2015年国家电网计划通过开展“低电压”专项治理，制定了配网“低电压”治理原则，要求坚持多措并举、统筹管理，深入分析“低电压”产生的原因，按照“先管理、后工程”，“一台区、一方案”的要求，综合管理、基建、技改及大修等多种手段，科学定制治理方案。而低压台区多为单相用电负荷，随着经济的发展，冰箱、空调器等

大功率单相家用电器日益增多，由于接入相位的随意性、用电时间上的随机性等因素，三相不平衡问题在低压配电网中显得尤为突出^[1]，以往所关注的低电压成因已经不能充分解释目前的低电压问题，是低电压治理方案制定的瓶颈。

文献[2-6]从技术和管理两方面阐述了低电压的成因，分别就配电线路、配电变压器、负荷、无功补偿不足和综合调压能力等对低电压影响进行了概述。其中文献[3]提出从首末端两方面分析低电压的成因；文献[7]针对云南农村低电压问题进行分析，低电压成因主要因为供电半径过长、中线故障、日负荷波动和无功补偿不足；文献[8]从配电变压器和输电线路电压损耗公式出发，分析了变压器和线路参数对电压损失造成的影响；文献[9]提出了以三相负荷不平衡损失系数为主要因素的低压台区线路线损理论计算的数学模型和等效电阻计算方法，三相负荷不平衡是影响低压台区线损的主要因素之一，也是影响低压台区线损理论计算准确度的主要因素之一。以上文献主要对低压台区低电压问题进行了分析概述，而台区低电压可能是其中某个因素或多个因素综合作用的结果，根据以上文献并不能作出准确判断。在上述文献研究的基础之上，本文通过采集低压台区实际运行数据，基于序分量分析对台区低电压问题的机理进行研究，分析配电变压器和供电线路的正序压降、负序压降和零序压降对台区低电压的影响程度，确定造成台区低电压的根本原因。在此基础之上，对低压

关键词/Keywords

低压台区·
低电压·
三相不平衡·
序分量·

低电压台区诊断与治理技术体系研究 (GZHKJ 00000013)。

台区配网进行建模仿真，通过实测数据验证仿真模型的正确性，并仿真电压序分量对台区低电压的影响程度，为科学选取台区低电压治理方案提供一定的理论借鉴。

1 低压台区实际运行数据

1.1 低压台区运行数据分析

探讨电能质量问题根本原因，电能质量测试与评估是必要的手段。针对广州钟二村低压台区供电质量问题，通过对钟二村5#台区1#变压器首端供电母线和该台区输电线路末端用户供电电压测试，首末端基波电压有效值测试分析结果如图1和图2所示，统计结果如表1所示。

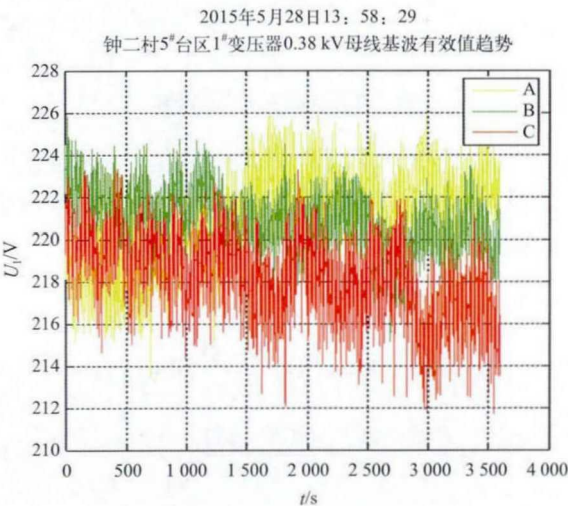


图1 钟二村首端基波电压有效值趋势图

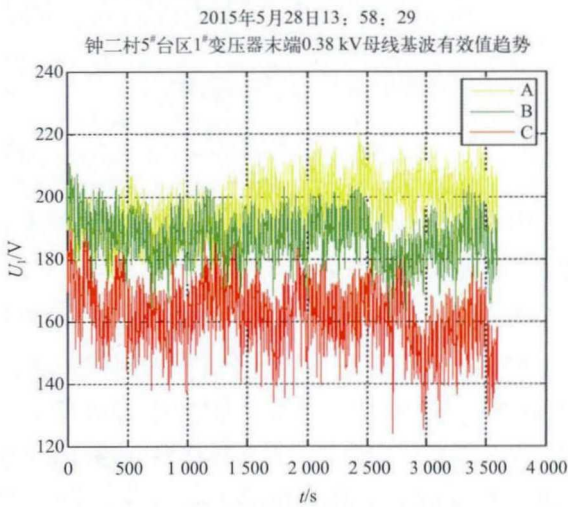


图2 钟二村末端基波电压有效值趋势图

表1 钟二村首末端基波电压有效值报表

(单位: V)			
供电母线		供电首端	供电末端
max	A	226.08	220.16
	B	225.82	211.05
	C	223.34	189.68
min	A	213.47	161.15
	B	215.11	158.51
	C	211.72	123.99
mean	A	221.06	196.73
	B	220.68	185.89
	C	218.23	161.91

从趋势图和报表可以看出：该台区首端电压平均值分别为221.06 V、220.68 V和218.23 V，最小值分别为213.47 V、215.11 V和211.72 V，首端电压略偏低，三相电压基本平衡；末端电压最小值分别为161.15 V、158.51 V和123.99 V，末端三相电压不平衡，且三相电压严重偏低，C相电压持续越下限。

钟二村5#台区首端三相电流基波有效值趋势如图3所示，统计报表如表2所示。

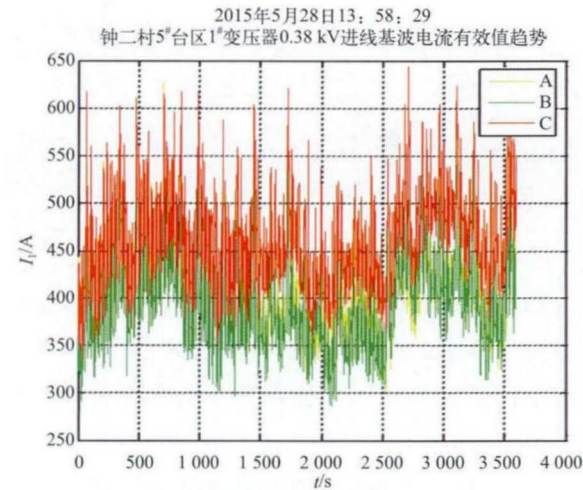


图3 钟二村首端基波电流有效值趋势图

表2 首端基波电流有效值报表

(单位: A)		
供电母线		供电首端电流
max	A	627.38
	B	578.96
	C	644.72
min	A	299.78
	B	279.47
	C	336.95

(续)

供电母线		供电首端电流
mean	A	416.73
	B	397.2
	C	458.9

从趋势图和报表可以看出：该台区首端三相电流平均值分别为416.73 A、397.2 A和458.9 A，三相电流不平衡。

综上，广州钟二村低压台区存在低电压、三相电压和电流不平衡的问题。

1.2 造成低电压问题的原因

针对广州钟二村台区存在末端电压偏低的问题，对该台区电能质量测试数据进行序分析，该台区首端正序电压最小值为217.52 V，负序电压最大值为0.98 V，零序电压最大值为7.92 V，末端正序电压最小值为159.07 V，负序电压最大值为5.49 V，零序电压最大值为43.65 V，功率因数0.95，该低压台区首末端序电压分析报表如表3所示。

表3 钟二村首末端电压序分量

(单位：V)

	正序	负序	零序
首端电压	217.52	0.98	7.92
变压器压降 ΔU_T	—	0.98	7.92
线路压降 ΔU_L	58.45	4.51	35.73
末端电压	159.07	5.49	43.65

从首末端电压序分量分析可得。

1) 该台区首端正序电压217.52 V，首端电压基本满足要求；首末端正序电压差高达58.45 V，输电线路等效阻抗正序压降是末端电压偏低的主要原因。

2) 首端三相零序电压的最大值为7.92 V，变压器零序等效阻抗压降是末端电压偏低的主要原因；首末端零序电压之差高达35.73 V，输电线路零序阻抗对零序电压影响很大。

3) 首末端三相电压的不平衡分量中，零序电压分量明显大于负序电压分量，可见首末端三相电压不平衡主要由零序电压引起。

4) 该台区功率因数0.95，无功需求较小，无功压降不是末端电压偏低的原因。

2 基于序分量的低电压问题建模与机理分析

2.1 正序压降的机理分析与阻抗模型

低压台区正序阻抗模型如图4所示，其中 $\dot{U}_s$ 为供电电源的正序电压； $\dot{U}_1$ 为低压台区供电末端的正序电压； $R+jX$ 为供电变压器和输电线路的等效正序阻抗； $\dot{I}_1$ 为流经线路正序电流； $P+jQ$ 为用电负荷正序功率。

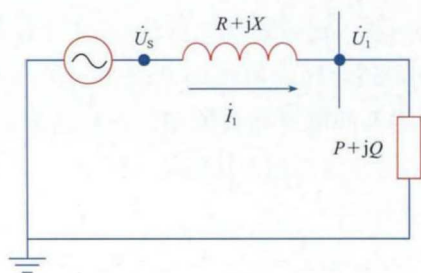


图4 低压台区正序阻抗模型

假设负荷正序功率为： $\dot{S} = P + jQ = \dot{U}_1(\dot{I}_1)^*$ 。

则负荷正序电流在变压器和输电线路的等效正序阻抗 $R+jX$ 上产生的正序压降 $\Delta \dot{U}_1$ 为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(R+jX) \\ &= \left(\frac{\dot{S}}{\dot{U}_1} \right)^* (R+jX) = \frac{P-jQ}{(\dot{U}_1)^*} (R+jX) \\ &= \frac{P(R+jX)}{(\dot{U}_1)^*} + \frac{Q(X-jR)}{(\dot{U}_1)^*} \end{aligned} \quad (1)$$

其中，由有功功率引起的有功压降为

$$\Delta \dot{U}_P = \frac{P(R+jX)}{(\dot{U}_1)^*} \quad (2)$$

由无功功率引起的无功压降为

$$\Delta \dot{U}_Q = \frac{Q(X-jR)}{(\dot{U}_1)^*} \quad (3)$$

但在实际应用中，用户关心的是电压的绝对压降，即 $\Delta U = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_1|$ 。

由于 $\dot{U}_1 = \dot{U}_s - \Delta \dot{U}_P - \Delta \dot{U}_Q$ ，因此节点2相对于节点1的绝对压降为： $\Delta U = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_1| = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_s - \Delta \dot{U}_P - \Delta \dot{U}_Q|$ ；由有功功率引起的绝对压降为： $\Delta U_P = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_s - \Delta \dot{U}_P|$ ；由无功功率引起的绝对压降为： $\Delta U_Q = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_s - \Delta \dot{U}_Q|$ 。

根据以上正序电压机理分析可知：产生正

序压降与变压器、输电线路等效阻抗和负荷正序功率有关,变压器和输电线路的等效正序阻抗越大,正序压降越大;用电负荷的正序功率越大,正序压降越大。根据正序压降机理,低电压成因判断原则如下:①首端正序电压偏低,则可以判断10 kV中压输电线路末端电压偏低;②首末端正序压降较大,说明输电线路等效阻抗正序压降较大,而造成输电线路等效阻抗压降较大的原因主要有供电半径较大、输电线路线径较小、变压器重载或过载,输电线路载流量过大和功率因数较低,无功压降较大。

2.2 负序压降的机理分析与阻抗模型

低压台区负序阻抗模型如图5所示,其中 $\dot{U}_2$ 为低压台区供电末端的负序电压; $R_2 + jX_2$ 为供电变压器和输电线路的等效负序阻抗; $\dot{I}_2$ 为流经输电线路负序电流; $\dot{I}_{2s}$ 为负荷三相不平衡产生的负序电流。

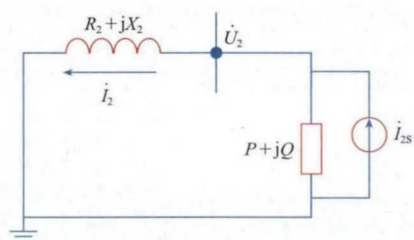


图5 低压台区负序阻抗模型

则负序电流在变压器和输电线路的等效负序阻抗 $R_2 + jX_2$ 上产生的负序电压为

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) \quad (4)$$

根据以上负序电压机理分析可知:负序电压的大小与负序电流和变压器、输电线路阻抗有关,负序电流越大,输电线路末端负序电压越大。负序电流是负荷三相不平衡用电产生的,三相不平衡是负序电压产生的根本原因。

2.3 零序压降的机理分析与阻抗模型

零序潮流由负荷流向系统从变压器中性点处通过中性线又流回负荷,因此,零序电流不仅会在相线阻抗、变压器阻抗上产生零序电压,还会在中性线上产生零序电压,且中性线上的零序电流为相线零序电流的3倍。低压台区多为三相四线制系统,变压器接线方式存在Yyn和Dyn两种连接

方式,且变压器两种连接方式零序等效模型存在较大差异,此处不详细介绍变压器序阻抗等效模型^[10-12]。

零序电流流经中性线形成回路,使得零序电压与正负序有很大不同。低压台区零序阻抗模型如图6所示,其中, X_0 为变压器零序等效阻抗; Z_{L0} 为线路零序等效阻抗; Z_N 为中性线零序等效阻抗; Z 为负荷零序等效阻抗; $\dot{I}_{0s}$ 为不平衡负荷产生的零序电流; $\dot{I}_0$ 为流经输电线路零序电流。

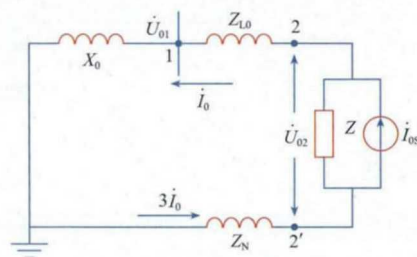


图6 低压台区零序阻抗模型

首端零序电压 $\dot{U}_{01} = \dot{I}_0 X_0$,末端零序电压 $\dot{U}_{02} = \dot{I}_0 (X_0 + Z_{L0} + 3Z_N)$ 。

则首末端绝对零序压降为 $\Delta U = |\dot{U}_{01}| - |\dot{U}_{02}|$,可以看出中性线零序阻抗对零序电压影响很大。

根据以上零序电压机理分析可知:零序电压与变压器和输电线路零序等效阻抗、零序电流大小有关。变压器和输电线路的等效零序阻抗越大,零序电压越大;用电负荷的零序电流分量越大,零序电压越大。根据零序电压机理,低电压成因判断原则如下:①首端零序电压较大,说明变压器零序等效阻抗较大,变压器接线方式可能为Yyn0;②首末端零序电压差过大,说明输电线路等效阻抗较大或零序电流分量较大,而输电线路零序等效阻抗包括中线零序等效阻抗和相线零序等效阻抗。

3 低电压成因仿真

3.1 仿真模型

以广州钟二村低压台区为研究对象,建立该低压台区三相四线制配电系统模型。假设10 kV出口电压三相平衡,负荷均为阻感负荷,线路阻抗

以电阻为主,感抗约为电阻值的1/2。其中输电线路为铜芯架空线,全长460 m,其系统仿真模型如图7所示, U_A 、 U_B 和 U_C 为5.77 kV(线电压10 kV)供电电压,点画线框内部分为电压比为10 kV/0.4

kV的变压器, Z_{xy} ($x=a,b,c; y=1,2,3,4$)为输电线路每段等效阻抗, L_{xy} ($x=a,b,c; y=1,2,3,4$)为输电线路每个节点用电负荷等效阻抗, Z_{Nm} ($m=1,2,3,4$)为中性线每段等效阻抗。

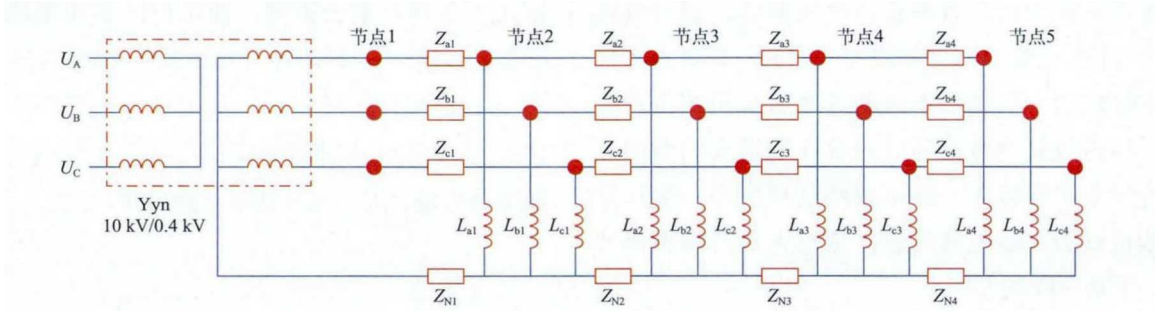


图7 低压台区系统仿真模型

3.2 仿真参数

该低压台区配电参数,变压器为S9系列,采取Yyn0接线方式,容量为500 kV·A,相线线径为95 mm²,中性线线径为70 mm²,最大负载率为79.5%。实际的配电网在运行过程中,用电负荷沿线分布,仿真模型中分别在280 m(节点2)、340 m(节点3)、400 m(节点4)和460 m(节点5)设置四条负荷支路,四点的负荷功率平均分配。

采集各节点电压电流值,通过傅里叶分析得到各节点电压基波有效值和电流基波有效值,对其进行对称分解,得到各节点电压序分量 $\dot{U}_{1N}$ 、 $\dot{U}_{2N}$ 和 $\dot{U}_{0N}$ ($N=1,2,3,4,5$),电流量序分量 $\dot{I}_{1N}$ 、 $\dot{I}_{2N}$ 和 $\dot{I}_{0N}$ ($N=1,2,3,4,5$),根据第2节序压降分析原理,分析各节点电压序分量大小,计算有功压降和无功压降。

3.3 仿真结果

根据低压台区用电参数设置仿真运行工况,其中变压器负载率79.5%,功率因数0.95,负序不平衡度8.5%,零序不平衡度6.5%,各节点序电压仿真结果如图8所示。

由图8和表4可以看出。

1) 正序电压压降最大,且正序压降主要是由正序有功功率引起的,正序无功功率引起的压降很小。

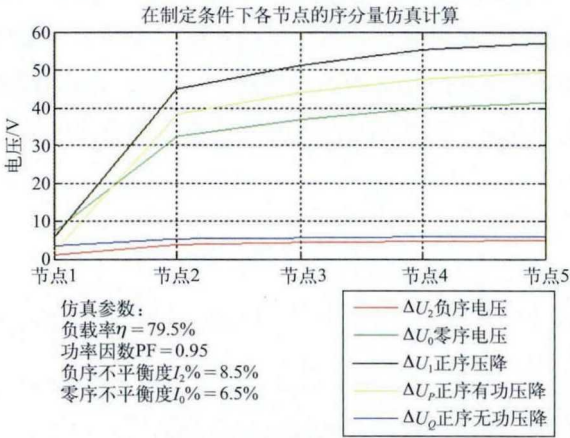


图8 负载率为79.5%时各节点序电压

表4 负载率为79.5%时各节点序电压报表

(单位: V)

电压	各节点的电压或压降				
	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5
ΔU_1	5.92	45.01	51.19	55.26	57.29
ΔU_p	2.36	38.34	43.99	47.69	49.53
ΔU_q	3.48	5.37	5.61	5.76	5.84
ΔU_0	7.36	32.53	36.91	39.83	41.3
ΔU_2	0.98	3.83	4.36	4.71	4.89

2) 首末端零序电压很大,是造成电压不平衡的主要因素。仿真分析结果与1.2节测试数据分析结果一致。

综上,该台区末端电压偏低主要是由变压器、输电线路正序压降和零序压降造成的。

设置仿真运行工况,变压器负载率有55.1%、63.9%、72%、79.5%和86.8%五种,功率因数

0.95, 负序不平衡度8.5%, 零序不平衡度6.5%, 各节点正序电压仿真结果如图9所示。

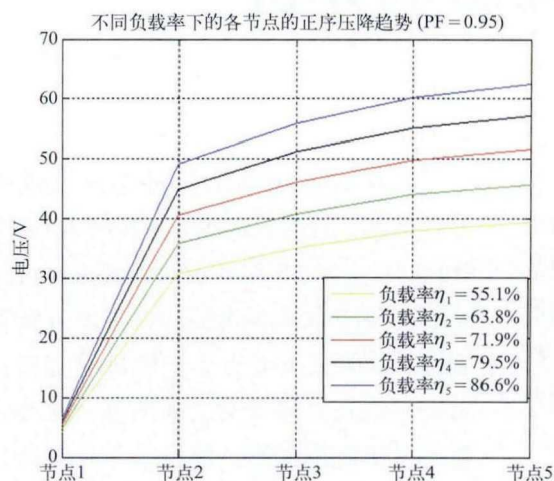


图9 不同负载率下各节点正序电压

由仿真曲线可以看出:随着负载率的增加,各节点正序电压的压降逐渐增大,且越靠近供电末端,压降增大的越显著。可见,随着负载率的增大,用户用电电流增大,使得电力输送过程中等效阻抗序压降增大,变压器重载或超载,也会造成低电压问题。

4 结束语

基于序分量分析低压台区低电压问题,可以准确具体地找到台区低电压的成因,以及各成因对低电压的影响程度,在此基础上,可以对症下药给出低电压解决方案。从本文分析可以看出,低压台区低电压有以下几个因素。

1) 从正序分量来看,10 kV末端电压偏低,造成变压器出线端电压偏低;供电半径较大,输电线路线径较小,输电线路正序等效阻抗较大,造成输电线路末端正序电压偏低;功率因数较低台区,正序无功压降造成输电线路末端电压偏低;变压器重载或超载时,输电线路电流过大使末端电压偏低。

2) 从负序分量来看,变压器和输电线路负序等效阻抗较大,负序电流较大时,产生较大的负序电压,使得输电线路末端电压偏低。

3) 从零序分量来看,变压器零序等效阻抗较大使得首端产生较大的零序电压;中性线、相线零序等效阻抗较大,零序电流较大时,末端产生较大的零序电压,使得输电线路末端电压偏低。

综上,低压台区低电压问题需分析其首末端正序、负序和零序电压,根据各电压序分量对低电压的影响程度,科学地选择低电压治理措施。

参考文献

- [1] 郝良,张艳妍,张森,等.低压三相负荷不平衡的解决措施[J].中国电机:技术版,2015(6):23-27.
- [2] 王金丽.农村“低电压”问题原因剖析[J].农村电气化,2011(9):5-6.
- [3] 张香明.关于低电压台区治理的探讨[J].农村电工,2014(10):37-38.
- [4] 伍建伟.浅析解决低压线路末端电压偏低问题的措施[J].现代制造,2012(33):27-28.
- [5] 刘永军,谷文军,贡德忠.“低电压”产生的原因及解决方案[J].农村电气化,2012(增刊1):113-114.
- [6] 范新桥,李慧,郭秋婷,等.基于密切值法的风电场低电压穿越性能综合评价[J].2016,11(10):13-18.
- [7] 张敏.云南农村低压电网电压质量分析与改进措施[J].价值工程,2014,33(4):70-72.
- [8] 翁锡安.农村低压配电网低电压问题分析[J].大众用电,2009(3):38-38.
- [9] 方向晖.基于三相负荷不平衡的公用低压台区线路线损计算[J].浙江电力,2011,30(9):57-60.
- [10] 方向.接线组Y,yn0与D,yn11型配电变压器的比较[J].农村电工,2003,10(11):26.
- [11] 王治,朱培刚,崔厚阳,等.各种接法配电变压器特征[J].变压器,2013,50(12):19-23.
- [12] 侯彦方.配电变压器采用Dyn11联结组的优势分析[J].电气应用,2008,27(6):50-52.

(收稿日期:2016-05-03) EA