

文章编号: 1005-0523(2017)05-0120-07

## 10 kV 配电网低电压问题及其改造研究

孙惠娟<sup>1</sup>, 姜磊<sup>2</sup>, 钱锬<sup>1</sup>, 徐露<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250022)

**摘要:** 为有效解决 10 kV 配电网因设备老旧而导致低电压、供电能力不足等问题, 以江西省典型 10 kV 配电网问题线路为例, 设计了一种基于广度优先遍历前推回代潮流算法对配电网供电现状以及所存在的问题进行分析。针对配电网所面临的问题因地制宜地提出 4 种改造措施相互搭配进行升级改造, 并对配电网改造效果进行潮流计算分析。最后, 在保证配电网电能质量的前提下, 通过对各种可行的改造方案进行经济性评估, 提出更经济合理的配电网改造方案。研究表明, 通过对问题配电网进行潮流计算分析, 制定更具有针对性的升级改造方案, 可以更经济有效地解决现有配电网所面临的问题, 避免配电网改造的盲目性。

**关键词:** 10 kV 配电网; 广度优先遍历; 前推回代潮流计算; 低电压; 改造措施; 经济评估优选

中图分类号: TM744

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.05.018

随着社会经济的高速发展, 人们生活水平的大幅度提高, 对电网的电能质量和供电可靠性的要求更高, 对电能的需求也急剧增长; 因此对中低压配电网提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。长期以来, 我国对中低压配电网的投资远远低于发电工程以及高压输电工程的投资, 配电网的建设也没有对未来用户负荷需求做出预估, 导致配电网的建设和发展严重滞后, 存在技术落后、结构不合理、供电能力不足、电能质量差、线损高等问题<sup>[2]</sup>。因此, 国家能源局制定了《配电网建设改造行动计划(2015—2020年)》, 并明确要加大配电网资金投入, “十三五”期间累计投资将不低于 1.7 万亿元, 为我国配电网发展提供了良好的条件。

当前, 国内众多学者已经对配电网的规划建设以及升级改造做了大量研究。文献[3]通过构建低压配电网无功补偿及效益评估系统, 对配电网进行潮流计算和无功优化配置计算, 并对不同补偿方案进行成本和效益的评估。文献[4]根据实际情况和配电网发展目标设定理想评估指标值, 针对规划目标年份及其他规划年份用电情况, 提出了配电网规划多阶段综合评估方法。文献[5]建立了配电网降损规划优化决策模型, 对规划方案进行经济性的优选。文献[6]通过负荷再分配, 提出了基于最大供电能力的配电网规划方法。文献[7]提出了利用供电区域划分提高配电网规划资产利用率的方法。文献[3-7]主要研究了配电网规划方案的评估以及优选, 但难以因地制宜地解决现有配电网所存在的问题, 难以应用于配电网的升级改造。文献[8]的研究表明串联补偿型限流器有助于改善功率因数, 提高传输能力, 提高电能质量, 但其改善配电网输电能力和供电质量的作用有限, 难以用于配网改造。文献[9]研究了配电网不同改造措施的节能潜力, 以节能潜力确定最终改造方案, 但其研究并未涉及配电网改造成本, 不能充分利用已有线路设备, 容易造成资源浪费。文献[10]建立了配电网改造优化模型, 对中压配电网改造项目的迫切度进行分析, 从而合理安排项目改造顺序, 有效利用资金, 但研究缺乏对配网运行现状的分析, 也没有提出具体的改造方案。文献[11]利用前推回代潮流算法对配电网的电能质量实时监测, 为配电网规划、设计与建设改造提供事实依据, 但并未考虑改造成本。文献[12]对低压配电网三相不平衡负荷进行分析计算, 提出了平衡三相负荷的方法。

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51567007); 江西省自然科学基金项目(20152ACB20017, 20171BAB206042); 江西省教育厅科技项目(GJJ160525, GJJ160526); 江西省“百人远航工程”(201780)

作者简介: 孙惠娟(1982—), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为配电网自动化。

综合上述,面对国内老旧配电网急需升级改造的现实,研究如何重新规划现有配电网,最大限度的利用已有配电网设备降低改造成本,提高配网的供电能力和供电质量,满足用电负荷需求具有重要意义。为此,本文首先基于广度优先遍历改进前推回代潮流算法,对配电网进行潮流计算,依据潮流计算结果分析配电网问题成因。然后,通过配电网问题成因有针对性的提出改造方案。然而,配电网的改造方案并不唯一,相关改造措施既能增加线路供电能力、提高供电质量,亦能降低配电网线路的网损,导致改造方案难以制定决策。为此,本文提出结合配电网改造成本、降损收益等因素对改造方案经济性进行评估以此确定最佳改造方案。

## 1 配电网潮流计算

针对配电网呈现辐射状,分支路较多,线径小等结构特点,本文采用前推回代法进行配电网潮流计算分析。前推回代法分“前推功率”和“回代修正电压”两步完成一轮迭代,具有迭代公式简单、不需要计算雅可比矩阵、计算速度快等优点,在进行配电网潮流计算时具有显著优势<sup>[13-15]</sup>。另外,由于配电网支路、节点众多,而前推回代算法要求支路节点要满足一定次序,因此本文还利用广度优先遍历方法对配电网拓扑结构进行编码排序进而提高算法计算效率。

### 1.1 配电网线路数据预处理

由于现有配电网数据通常以图纸的形式给出,根据前推回代潮流计算的原理需要将配电网图纸中反应线路拓扑结构、线路阻抗参数、线路负荷等信息转化为算法可以读取的数据。其中,配电网节点间的拓扑结构可以通过将图纸中各负荷节点、分支节点命名,利用命名节点确定各节点之间连接关系来体现;线路阻抗参数值( $R_{m,n}, X_{m,n}$ )可以通过节点间距离、线径进行计算,如式(1)所示;线路负荷可以通过线路变压器的运行数据得到。

$$R_{m,n}=r_{m,n}l_{m,n}, X_{m,n}=x_{m,n}l_{m,n} \quad (1)$$

式中: $l_{m,n}$ 为节点 $mn$ 段线路长度,m; $r_{m,n}, x_{m,n}$ 分别为 $mn$ 段线路单位长度电阻、电抗值, $\Omega$ ,如附表1所示。

表1 广度优先节点邻接表  
Tab.1 Breadth-first node adjacency

支路编号	首节点	末节点	支路编号	首节点	末节点
1	1	3	1	1	3
2	3	4	2	1	2
3	4	7	3	3	4
4	7	12	4	3	5
5	1	2	5	4	7
6	4	6	6	4	6
7	6	10	7	5	8
8	7	11	8	5	9
9	3	5	9	6	10
10	5	8	10	7	12
11	5	9	11	7	11

### 1.2 广度优先遍历节点编号

由于配电网中的节点编号通常不具有与网络层次相关的规律,且节点关系复杂。以图 1 为例,该示例配电网中共有 12 个节点,节点标号用字母表示,  $a$  为变压器出口母线节点,支路标号用数字表示。对于连通图的遍历,广度优先遍历相对于深度优先遍历效率更高<sup>[16-17]</sup>。因此首先通过广度优先搜索将配电网节点按广度优先重新编号,以主线首节点  $a$  为起始节点,按支路分层顺序由小到大重新进行排列编号,得到广度优先配电网节点邻接表(支路起始节点连接关系表),根据广度优先节点邻接表即可进行前推回代潮流计算。

广度优先遍历节点编号方法如下:

1) 如图 1 所示,以  $a$  为起始节点采用广度优先搜索算法对各配电网节点进行广度优先搜索,各节点按广度优先顺序(先搜索到地节点优先编号)重新进行依次编号。广度优先编号过程如图 2 所示,其中虚线框内为先进先出地节点队列。

2) 将原始编号  $a\sim f$  重新编号为广度编号 1~11,根据广度优先遍历首段节点号应小于末端节点号,得到表 1 左所示的节点邻接表。然后将表 1 左连接表按首段节点编号从小到大重新对支路进行编号,最终形成表 1 右所示的广度优先节点邻接表。

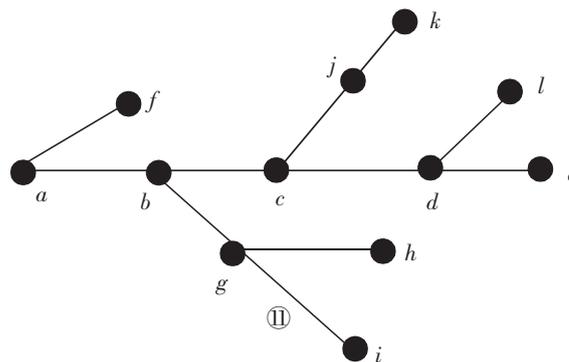


图 1 配电网结构

Fig.1 Structure of power distribution network

### 1.3 前推回代潮流计算

前推回代法计算量小,适合求解以辐射状网络为主的配电网,因此本文用其进行配电网的潮流计算。由于该计算理论成熟,故仅作简要介绍<sup>[13-15]</sup>。

前推回代法每次循环迭代分为如下两步:

前推:由末节点到首节点完成前推操作,该操作根据式(2)完成逐条支路的功率计算;

回代:由首节点到末节点完成回代操作,该操作根据(3)式计算并修正逐条支路的电压。

通过如此反复迭代计算最终求得配电网的潮流分布,电压初值为额定电压。在前推回代潮流计算方法的基础上,根据广度优先遍历节点编号方法能够实现前推与回代操作的高效有序进行,在取得同样计算精度的前提下,可显著提高计算速度。

$$\left. \begin{aligned} S_{l,E} &= S_{l,E} + S_{load,l,E} \\ S'_{l,E} &= S_{l,E} + |S_{l,E}| / |U_{l,E}|^2 Z_l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{l,F} &= S_{l,F} + S'_{l,E} \\ U_{l,E} &= U_{l,F} - (S'_{l,E} / |U_{l,E}|) Z_l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $S, S'$ 分别为节点所连上游线路的末端复功率、首端复功率,  $kVA$ , 每次循环前  $S, S'$ 均为 0;  $S_{load}$ 为节点所接负荷的复功率;  $U$ 为节点电压,  $kV$ ;  $l$ 为支路。

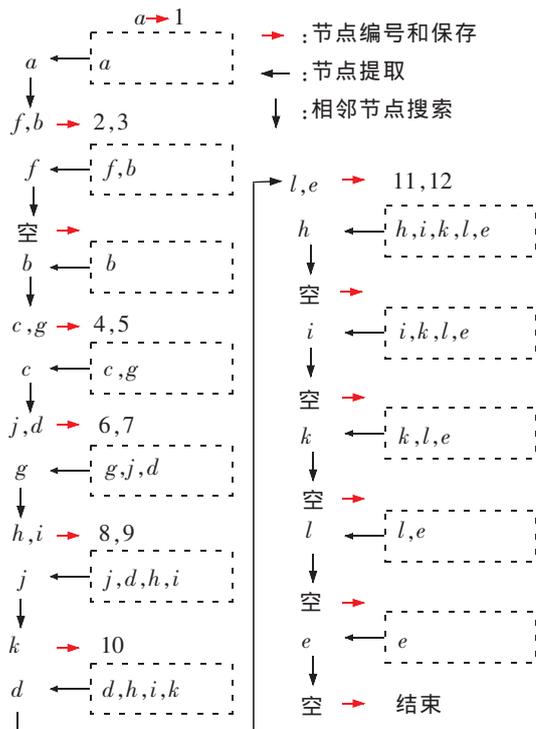


图 2 配电网广度优先搜索过程

Fig.2 Breadth-first search process of power distribution network node

## 2 配电网改造措施及经济评估

### 2.1 配电网改造措施

当前对配电网改造多集中于单一措施的研究,而采用多种改造措施相互搭配,可在解决配电网问题基础上取得更长远经济效益<sup>[5,9-10]</sup>。

1) 无功补偿装置。投入一定无功补偿后,由式(4)可知线路有功损耗减小;根据式(5)适当投入无功补偿可减少线路首端无功输出,电压损耗减少,从而改善电压质量。

$$\Delta P_0 = \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_0^2}, \Delta P_1 = \frac{P_0^2 + (Q_0 - Q_C)^2}{U_0^2} R \quad (4)$$

$$\Delta U_0 = \frac{P_0 R + Q_0 X}{U_0}, \Delta U_1 = \frac{P_0 R + (Q_0 - Q_C) X}{U_0} \quad (5)$$

式中: $\Delta P_0$ 为初始有功损耗,kW; $\Delta P_1$ 为投切电容器后有功损耗,kW; $\Delta U_0$ 为初始电压损耗,kV; $\Delta U_1$ 为投切电容器后电压损耗,kV; $P_0, Q_0$ 为线路首端有功及无功功率,kW,kVar; $Q_C$ 为电容器无功功率,kVar; $U_0$ 为负荷电压,kV; $R, X$ 为线路等效电阻和等效电抗。

2) 增加导线截面:

$$R = \rho l / s \quad (6)$$

式中: $\rho, l, s$ 分别为导线电阻率、长度、截面积。根据式(6),增大 $s$ 后线路等效电阻 $R$ 减小,由式(4)(5)可知线路有功损耗和电压损耗会随等效电阻的减小而减小。

3) 安装调压器。由式(7)可得,当线路电压较低时安装自动调压器可使安装点后的电压从 $U_b$ 提升到 $U_a$ ,其中 $k$ 为调压器变比。根据式(4),电压升高,安装点后的线路有功损耗将减少。

$$U_a = k U_b \quad (7)$$

4) 缩小供电半径。缩小配电网供电半径,即导线长度 $l$ ,由式(6)得线路等效电阻 $R$ 减小,从而降低有功损耗和电压损耗。对于供电半径过大,负荷过重,规划新增负荷较多的线路可在线路适当位置新增电源布点,从而缩小配电网供电半径,提高线路供电能力,改善电压质量,降低线路网损。

### 2.2 配电网改造经济评估

当前,配电网改造工作主要依靠以往经验,改造措施具有较大盲目性,且不能保证配电网的每个节点都能达到相关标准。另外,上述配电网的4种改造措施可以有很多种组合方案,也不宜盲目选取,而应根据相关理论计算进行科学选取。为此根据式(8)以配电网改造投资成本与年网损费用之和作为改造方案经济评估成本,基于该项计算结果对配电网改造方案的种类选取、搭配方式以及具体改造位置进行评估决策,从而制定经济有效的改造方案。

$$C_{\text{sum}} = \Delta P_{\text{lass}} \tau_{\text{max}} r + \sum_{i=1}^m C_i \quad (8)$$

式中: $C_{\text{sum}}$ 为改造方案经济评估成本; $\Delta P_{\text{lass}}$ 为最大负荷时功率损耗; $\tau_{\text{max}}$ 年最大负荷利用小时数; $r$ 为上网电价,元; $C_i$ 为第 $i$ 种改造措施的总成本; $m$ 为采取改造措施的数目。

## 3 算例分析

如图3所示,以江西省某10 kV配电网为例,通过基于广度优先遍历编码的前推回代法进行潮流计算,并依据潮流计算结果对该配电网所存在的问题以及成因进行分析。而后,根据配电网所存在问题因地制宜提出多种可能的改造方案,并通过前文所提出的经济性评估方法进行决策,确定最佳的配电网改造方案。

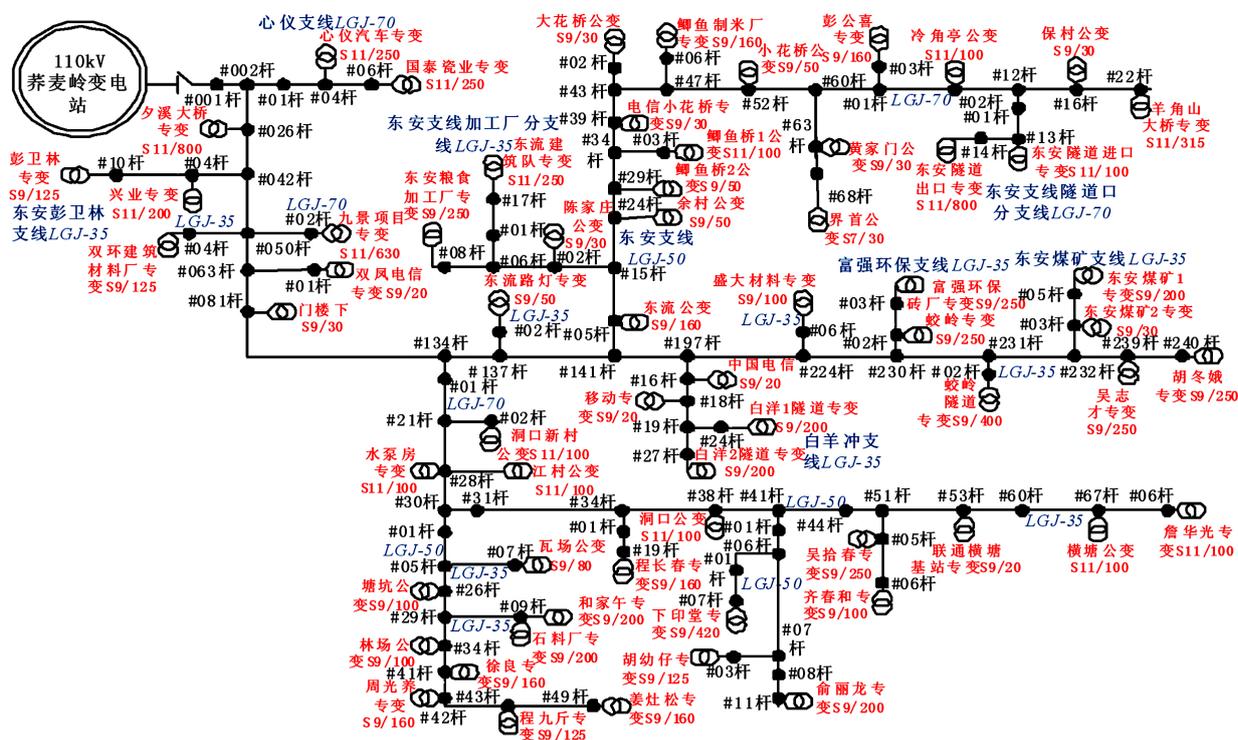


图3 某10 kV配电网线路结构图

Fig.3 Line structure of a 10 kV distribution network

### 3.1 配电网现状分析

以图3主线#1-141以及东安支线的潮流计算结果(图5所示)为例进行分析。

根据计算结果可知该配电网存在如下问题:

首先, #63号杆塔(图3杆塔标号与图4,5节点序号的对应关系)以后线路存在严重的低电压问题,最低电压为7.8207 kV。其次,主线#20-134的输电线为LGJ-95,输电线截面积较小而传输功率较大,为3.68~5.09 kW,导致线路供电能力不足,网损、线路压降过大等问题。对于线路传输容量不足问题,首先可采取更换更粗导线方式增大线路传输功率,降低导线压降。其次,可采取增加台区布点分担供电负荷,缩短供电半径解决。对于低电压问题,则可以通过在线路末端添加无功补偿装置以及加装调压器解决。

### 3.2 配电网改造方案研究

由于该配电网线路存在严重的低电压和输电能力不足的问题,单一改造方案不能有效解决配电网所面临的问题,因此着重研究多种改造措施相互搭配的组合方案。针对主线线径较小输电能力有限,负荷集中在线路#141之前的特点,采取了如下4种措施:措施1,主线#20-141的输电线换为LGJ-120,提高输电能力,降低主线引起网损和压降;措施2,由于线路的低电压问题严重,换线等方式提升电压的能力有限,因此需要采取在电压偏低点(#79号杆塔)安装调压器大幅度提高节点电压;措施3,对于负荷较重的支线(东安支线),将输电线换为LGJ-95,提高支线输电能力、降低网损;措施4,对于支线末端存在轻微低电压问题的线路,可以在线路末端节点安装无功补偿装置提高支线的电压、功率因数。

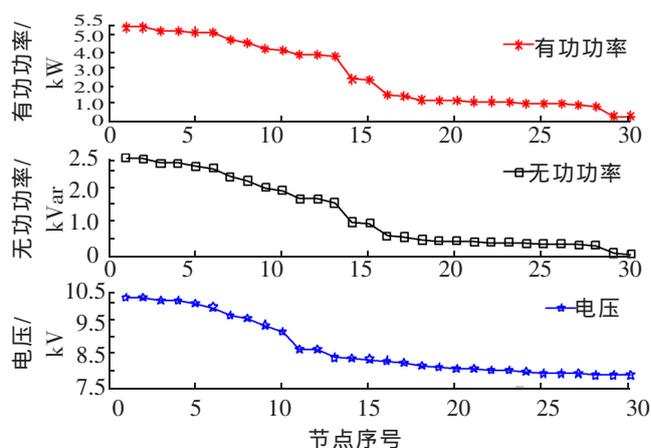


图4 配电网运行现状

Fig.4 Operation status of the old distribution network

图 5 所示为换主线线径 1 种措施、换线径安装调压器 2 种措施、换线径安装调压器无功补偿 3 种措施的改造效果。由图可知,仅换线径无法解决低电压问题,仅装调压器又无法提高输电能力,而采取 2 种及以上改造措施合理搭配可以有效解决上述问题。

### 3.3 配电网改造经济评估

由于配电网改造方案并不唯一,因此本文依据 2.2 节配电网改造经济评估方法进行优选。设将主线更换为 LGJ-120 的成本为 20 元/m,支线更换为 LGJ-95 的成本为 15 元/m,无功补偿的成本为 120 元/kVar, $r$  为 0.3 元/kWh, $\tau_{\max}$  取为 3 600 h。

该配电网最可能采取的 9 种改造方案的改造效果及经济评估成本如表 2 所示。由于 10 kV 配电网允许电压偏移为额定电压的+5%~-7%,即最低允许电压为 9.3 kV,因此单纯采用 1 措施的改造方案一与改造方案二依然存在低电压问题,改造效果不合格。而采用 2 种及以上改造措施的改造方案三至改造方案九不存在低电压问题,改造合格。在合格的改造方案中方案四最为经济,全寿命成本为 1 268 948 元,采用了更换主线、添加调压器和无功补偿装置 3 种搭配措施,具体改造方案如表 2 所示。其他合格改造措施,虽然可行但经济性差,因此可为该 10 kV 配电网改造方案的决策提供理论依据。采用改造方案四改造后的主线及东安支线各节点潮流计算结果,如附表 2 所示。

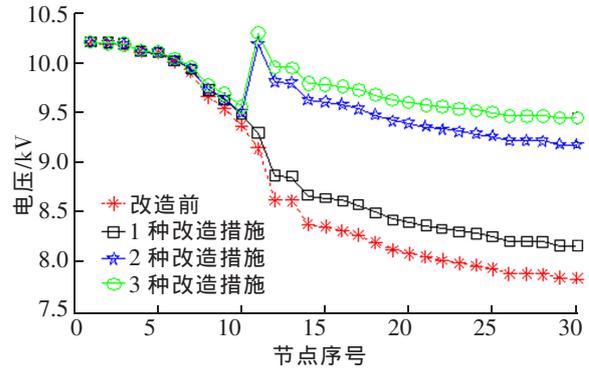


图 5 配电网改造效果

Fig.5 Transformation effect of distribution network

表 2 配电网改造效果对比

Tab.2 Comparison of distribution network transformation effects

改造方案	改造前	一(措施 1)	二(措施 1,2)	三(措施 1,2,4)	四(措施 1,2,4)	五(措施 1,2,4)	六(措施 1,2,3)	七(措施 1,2,3,4)	八(措施 1,2,3,4)	九(措施 1,2,3,4)
更换主线长度/m	0	8 400	8 400	8 400	8 400	8 400	8 400	8 400	8 400	8 400
调压器/台	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
更换支线长度/m	0	0	0	0	0	0	9 380	9 380	9 380	9 380
无功补偿容量/kVar	0	0	0	200	300	400	0	100	200	300
主线传输功率/kW	5 319.1	5 161.7	5 089.2	5 060.5	5 049.1	5 039.6	5 055.3	5 041.7	5 029.7	5 019.1
网损功率/kW	793.1	635.7	563.2	534.5	523.1	513.6	529.3	515.7	503.7	493.1
末端电压/kV	7.820 7	8.153 7	9.171 6	9.313 6	9.382	9.411 1	9.340 3	9.409	9.476 4	9.542 4
改造结果	低电压	低电压	低电压	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
改造评估成本/元	856 548	854 556	1 276 256	1 269 260	1 268 948	1 270 688	1 380 344	1 377 656	1 376 696	1 377 248

## 4 结论

本文首先通过提出广度优先遍历前推回代潮流算法对老旧配电网的潮流分布情况进行计算,并以此分析研究该配电网所存在的问题和问题成因。然后,提出通过增设无功补偿、更换导线线径、安装调压装置、缩小供电半径4种改造措施相互搭配,对配电网进行有针对性的技术改造。最后,对相互搭配合格改造方案进行经济评估,并以此制定决策提出经济有效的改造方案,避免仅凭经验盲目施工。

### 参考文献:

- [1] 顾宇桂,司政,单葆国,等. 东部地区近期电力需求走势分析[J]. 中国电力,2012,45(10):32-34.
- [2] 刘海波,胡滨,王旭阳. 关于“十三五”配电网发展的思考[J]. 中国电力,2015,48(1):21-24.
- [3] 张海鹏,林舜江,刘明波,等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J]. 电力系统保护与控制,2016(4):129-136.
- [4] 卢志刚,陈伟坤,张晓辉,等. 城市电网输配全局最大供电能力分析[J]. 电网技术,2015,39(6):1623-1630.
- [5] 杨文锋,王彬宇,程卓,等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术,2014,38(9):2598-2604.
- [6] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):106-113.
- [7] 周莉梅,屈高强,刘伟,等. 配电网供电区域划分方法与实践应用[J]. 电网技术,2016,40(1):242-248.
- [8] 赵鸿飞,陈伟,邵方静,等. 串联补偿型限流器对10 kV配电网的影响研究[J]. 高压电器,2014(12):24-29.
- [9] 曾建敏,白先红,张勇军,等. 多目标配电网综合节能潜力评估[J]. 电力系统保护与控制,2014(13):100-105.
- [10] 荆朝霞,曾丽. 基于改进层次分析法的配电网中压改造项目迫切度分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):92-95.
- [11] 王金丽,盛万兴,宋祺鹏,等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术,2014,38(2):515-519.
- [12] 傅军栋,喻勇,刘晶. 低压配电网三相不平衡节能算法研究[J]. 华东交通大学学报,2014,31(3):110-114.
- [13] 高元海. 现代配电网分析与优化问题研究[D]. 南昌:南昌大学,2015.
- [14] 郭剑峰,孙惠娟,苑方丞. 一种实用的配电网潮流算法[J]. 华东交通大学学报,2009,28(5):84-88.
- [15] 高亚静,苗宏佳,吴文传,等. 基于阻抗补偿的三相四线制配电网前推回代潮流算法[J]. 电力系统自动化,2015(7):47-51.
- [16] 韦冬冬. 基于显微图像的PTA粒径分布估计方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [17] 陈瑞. 配电网单相接地故障诊断系统的研制与开发[D]. 北京:华北电力大学,2014.

## Research on Problems and Improvement of 10 kV Low Voltage Distribution Network

Sun Huijuan<sup>1</sup>, Jiang Lei<sup>2</sup>, Qian Kun<sup>1</sup>, Xu Lu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250022, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low voltage and insufficient supply capacity caused by ageing equipments, this paper, taking the typical 10 kV distribution network of Jiangxi Province as an example, designed a new power flow algorithm by way of forward-backward sweep method based on breadth first traversal encoding to analyze the power supply situation and the existing problems of distribution network. Then this paper put forward four transformation measures to upgrade distribution network and analyzed its transformation effect by power flow algorithm. Finally, through economic evaluation on various feasible transformation measures, a more economical and reasonable scheme of distribution network reconstruction was proposed under the premise of guaranteeing the power quality of distribution network. The research shows that the power flow calculation of distribution network and the adoption of rational transformation measures may solve the distribution network problems and avoid the blindness of distribution network transformation.

**Key words:** 10 kV distribution network; breadth-first search; power flow algorithm; low voltage; transformation measures; economic evaluation and optimization

(责任编辑 刘棉玲)