低压配电网节能改造对沿线电压特性和线损率的影响

基于牛顿－拉夫逊潮流计算方法，对某低压配电网沿线路无功补偿、逆调压、更换导线等单项以及综合节能改造措施对其沿线电压特性和线损率的影响进行了静态比对分析。首先，简要介绍各节能改造手段，并根据相关导则确定其具体做法。然后在制定低压配电网潮流计算原则的基础上，利用牛顿－拉夫逊法计算了低压配电网进行各种节能改造措施前后的静态节点电压和线损率。通过实例表明，相比于单一的节能改造措施，综合运用多种措施能最大化地改善低压配电网沿线电压特性和线损率。最后，对低压配电网实际节能改造工作提出了建议。

戎　荣／广东南海电力设计院工程有限公司　陈欣晖　耿红杰　欧阳森／华南理工大学电力学院　黄春艳／广州市奔流电力科技有限公司

戎　荣／工程师

关键词／Keywords
低压配电网·
节能改造·
沿线电压特性·
线损率·
静态分析·

根据2013年南方电网社会企业责任报告，南方电网母公司口径综合线损率为6.02%，而全资产口径综合线损率为7.20%，两种口径的差异来源于县级供电企业普遍较高的线损率。而低压配电网作为县级供电企业的重要组成部分，具有线路长且支路复杂、线径小、负荷多变及无功支撑不足等特点，由此导致的电压质量和线损率问题不可忽视，具有巨大的节能改造空间[1]。

目前，供电企业对于低压配电网普遍采用的节能改造措施有更换导线、无功补偿、配电网结构整改以及逆调压等[2-5]。然而，在提高低压配电网电压质量和降低线损率的同时，也凸显出了需求判断不明、项目规划不全和措施成效不清的弊端[6]，尤其在基于低压配电网沿线电压特性复杂的情况下，对于如何选择无功补偿的地点、容量才能获得更佳的成效没有充分考虑，文献[7]只是针对10 kV配电网的沿线路无功分散补偿研究。因此，亟需根据实际情况对低压配电网各种节能改造措施进行投入前的全面分析与仿真，在微观层面上进行节能改造效果比对。

本文在充分考虑低压配电网沿线电压特性复杂的特点的基础上，提出了无功补偿等六种节能改造措施并确定其具体实施办法，通过极坐标系下的低压配电网牛顿－拉夫逊法潮流计算，对某供电局低压配电网单一和综合节能改造措施的电压和线损改造效果进行了静态分析比对，并提出低压配电网节能改造建议，以期指导低压配电网节能改造工作。

低压配电网节能改造措施

为了更好地提升低压配电网电压质量和降低其线损率，主要采用沿线路无功补偿、逆调压和更换导线的节能改造措施，其中无功补偿措施从沿线特性的角度选取了首端补偿、中段补偿、离首端2/3处补偿以及末端补偿4种方式。

（1）首端补偿

首端补偿是指在低压配电网的首节点加装电容器。根据《电力系统无功补偿配置技术原则》规定，其补偿容量有一定范围，一般为配电变压器容量的20%～40%，因此首端补偿的补偿容量可以按照下式来选择

$$Q_{c1}=S_{\text{主变压器}}(20\%\sim40\%) \quad (1)$$

（2）中段补偿

在线路中点附近装设无功补偿装置，补偿容量可按照负荷所需的无功容

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量的1/2左右来选择

$$Q_{c2}=Q_{总}(40\%\sim60\%) \tag{2}$$

式中，负荷所需的无功容量$Q_{总}$计算方法为

$$Q_{总}=P_{总}\tan(\arccos\beta) \tag{3}$$

式中，$P_{总}$为低压配电网的平均功率，由实际月电量数据按照每月30×8 h=240 h换算得到；β为功率因数，假设低压配电网各个节点的功率因数β均为0.85，下同。

（3）离首端2/3处补偿

所谓2/3补偿方式是指在离线路首端的2/3处进行无功补偿且补偿容量可按照负荷所需的无功容量的2/3左右来选择

$$Q_{c3}=Q_{总}(60\%\sim80\%) \tag{4}$$

（4）末端补偿

在线路末端进行无功补偿，能够使离电源较远的节点及时得到无功功率，避免无功功率的输送导致线路损耗大，电压质量低的问题，但是补偿容量不易过大，防止无功倒送，可以选择

$$Q_{c4}=Q_{总}(5\%\sim20\%) \tag{5}$$

（5）逆调压

逆调压就是指在负荷高峰时升高电压、负荷低谷时降低电压，即对母线电压的调压方式，从而使电压损耗不至过大，能够在一定程度上降低线路损耗。低压配电网在负荷高峰时段经常出现节点电压偏低的现象，调节10 kV母线电压可以对低压配电网电压进行整体抬升，从而达到改善电压质量和线损率的目的。一般来说，10 kV母线侧逆调压范围在10～10.7 kV之间。

（6）更换导线

线路等效电路如图1所示。由图1和网络元件的电压损耗公式（6）和功率损耗公式（7）可知，电压损耗和功率损耗都与线路阻抗大小成正比关系，即扩大导线截面积，能减小线路阻抗，继而有效地提升电压质量和降低线损率。

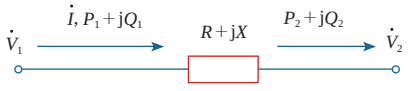


图1 线路等效电路

$$\dot{V}_1-\dot{V}_2=(R+jX)\dot{I}=\Delta\dot{V}_1+\delta\dot{V}_1=\frac{P_1R+Q_1X}{V_1}+\frac{P_1X-Q_1R}{V_1} \tag{6}$$

式中，$\Delta\dot{V}$为电压降落的纵分量；$\delta\dot{V}_1$为电压降落的横分量。

$$\Delta S_L=\frac{P_1^2+Q_1^2}{V_1^2}(R+jX) \tag{7}$$

低压配电网牛顿－拉夫逊潮流计算法

本文采用的是节点电压用极坐标表示时的牛顿－拉夫逊潮流计算法，图2为计算流程图。

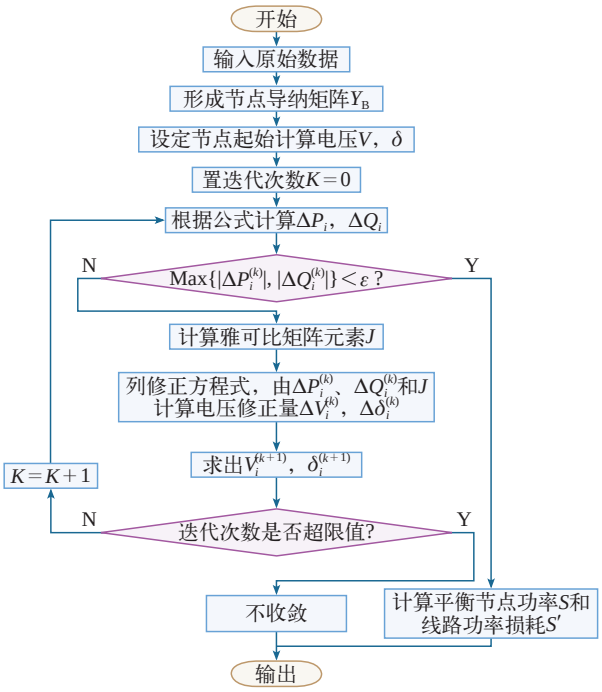


图2 低压配电网牛顿－拉夫逊潮流计算流程图

计算原则如下：

1）设低压配电网配电变压器高压侧节点为平衡节点，电压为10.3 kV。

2）其余节点均为PQ节点，各节点有功功率由2013年7～8月低压配电网实际电量数据换算而成，功率因数设为0.85。

3）线路参数如图3所示。

4）根据我国相关技术导则规定对于低压配电网380 V三相供电或220 V单向供电的电压允许偏差为额定电压的－10%～＋7%，即342～406 V。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实例分析

某供电局小虎村10#低压配电网网络等效拓扑图如图3所示，配电变压器型号为S9－200，容量为200 kV·A。2013年7～8月小虎村10#总电量为102 114.5 kW·h，即平均功率$P_{总}$为102 114.5 kW·h/(60 h×8)＝212.74 kW。节点1、5、6、7、8和9用户为用电大户，均分布在线路的中后段。

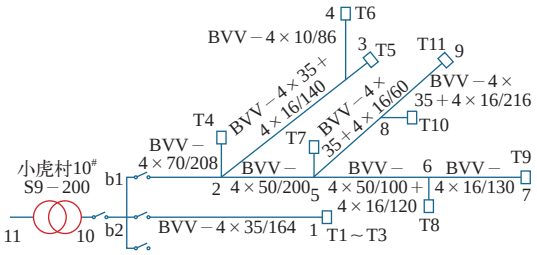


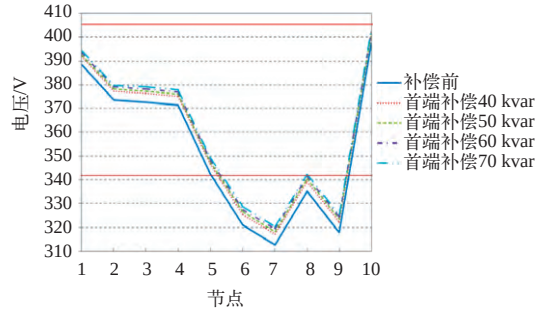
图3 小虎村10#网络等效拓扑图

如果进行上述所列出的各节能改造措施对其进行改造，可改善该低压配电网的电压质量和节能空间。本文以该低压配电网为例，根据上述提出的六个措施，进行节能改造对电压质量和线损率改善效果的静态对比分析。

1. 首端补偿

在图3中的10节点处进行电容器无功补偿，根据式（1），补偿容量分别选为40 kvar、50 kvar、60 kvar和70 kvar，图4和图5分别为首端补偿对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

可见，虽然无功补偿容量在不断增加，但是节点电压曲线基本上重合，节点电压特性改善情况不明显，原来不合格的节点仍然基本不合格；



注：红线间的区间为节点电压合格区间，下同。

图4 首端补偿对沿线电压特性的影响

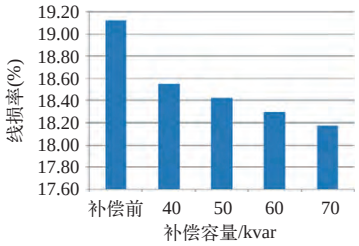


图5 首端补偿对线损率的影响

而在线损率改善方面也不是很很明显。这是由于首端补偿只能减少装设点以上线路和变压器因输送无功功率所造成的损耗，而不能减少用户内部配电网络的无功负荷所引起的损耗。

2. 中段补偿

在主干线路的中点即在5、6节点之间离5节点29 m处进行无功补偿，根据式（2）和式（3），补偿容量分别选为45 kvar、55 kvar、65 kvar和75 kvar，图6和图7分别为中段补偿对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

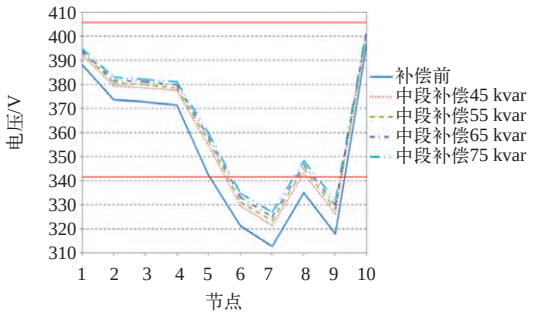


图6 中段补偿对沿线电压特性的影响

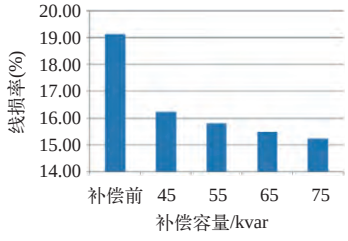


图7 中段补偿对线损率的影响

由图6可以看出，无功补偿前后电压有较明显的改善，8节点电压由不合格变为合格，但是6、7和9三个节点的电压仍然不合格。在图7中，当补偿容量为45 kvar时，线损率由原来的19.12%降低至16.23%，当补偿容量继续增加时，线损率相对减少量越来越小。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3. 离首端2/3处补偿

在5、6节点之间且离5节点97 m处进行无功补偿，且根据式（4），补偿容量选为60 kvar、70 kvar、80 kvar和90 kvar，图8和图9分别为离首端2/3处补偿对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

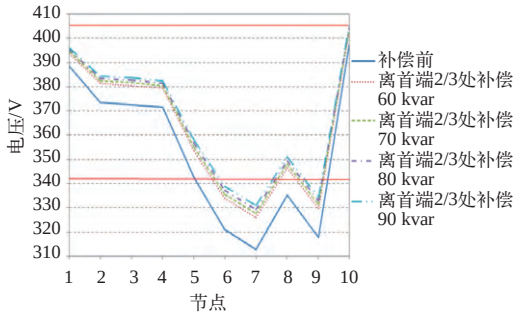


图8 离首端2/3处补偿对沿线电压特性的影响

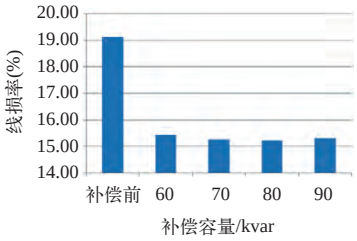


图9 离首端2/3处补偿对线损率的影响

容易看出，离首端2/3处补偿的方式对沿线电压特型和线损率改善的幅度比较大，但不同容量的无功补偿改善电压和线损率的效果都比较接近，而由于补偿容量选取90 kvar时由于容量过大，导致无功功率倒送，因此线损率相比补偿容量为80 kvar和70 kvar时还有所升高，是不可取的。

4. 末端补偿

在线路末端7节点处进行无功补偿，根据式（5），补偿容量可选取为5 kvar、10 kvar、15 kvar和20 kvar。图10和图11分别为末端补偿对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

可见，在小虎村10#的末端节点7进行无功补偿后电压改善的幅度不大，且不同容量的电容器改善电压的效果都比较接近，而对线损率的改善效果也较差，这主要是末端补偿方式中，主要还是就地补偿末端大用户的无功功率。

5. 逆调压

在原网络结构下，将配电变压器高压侧电压

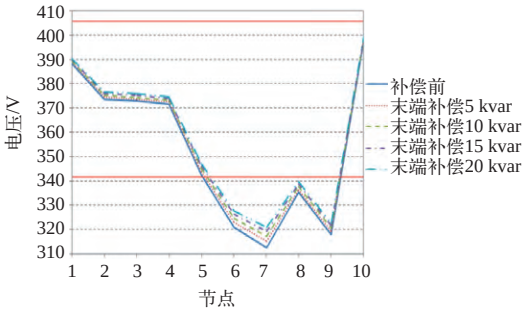


图10 末端补偿对沿线电压特性的影响

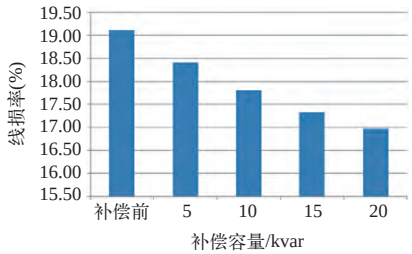


图11 末端补偿对线损率的影响

由原来的10.3 kV升至10.5～10.7 kV，图12和图13分别为逆调压措施对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

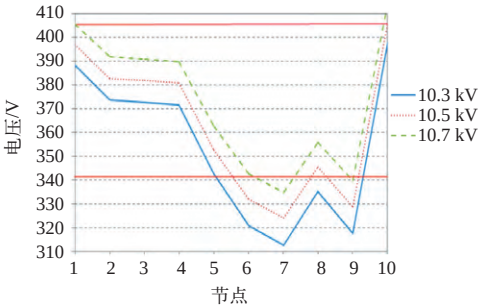


图12 逆调压对沿线电压特性的影响

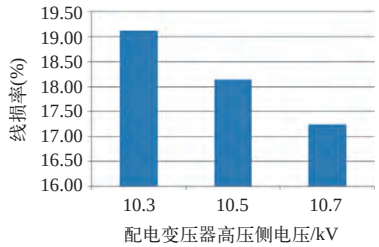


图13 逆调压对线损率的影响

由图12可以看出，配电变压器高压侧电压不断提高，各节点电压有明显的改善且为整体的提升，首段电压为10.3 kV时，6、7、8和9节点电压不合格。如果电压提高到10.5 kV，8节点电压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合格，6、7和9节点电压不合格，继续提高电压至10.7 kV，7、9节点电压略微有点偏低，但是已经很接近342 V。由于10.7 kV属于逆调压范围的上限，故不能再往上调。而由图13可以看出，随着配电变压器高压侧电压的不断提高，线损率是逐渐降低的，但是降低的幅度不大。首段电压从10.3 kV提高到10.7 kV，网损比例由19.12%降低到17.24%。

6. 更换导线

对小虎村10#低压配电网进行分析可知，b1支路线路长，分支多，大用户多数集中在此条支路，而且线路始段和中段的截面积只有70 mm^{2}和50 mm^2，因此本身的高阻抗加上在负荷高峰时承受的大电流，必定导致整个低压配电网的线损率偏大。因此可以针对这两段线路进行更换导线的节能改造。本文选取三种方式：

1）节点2、5之间导线的截面积扩大至70 mm^2。

2）节点2、5之间导线的截面积扩大至70 mm^2，且节点10、2之间导线的截面积扩大至95 mm^2。

3）节点10、5之间导线的截面积扩大至95 mm^2。

图14和图15分别为更换导线对小虎村10#沿线电压特性和线损率的影响。

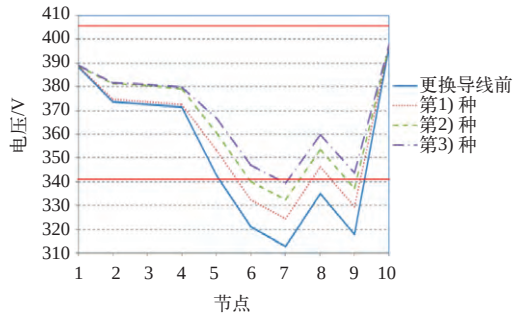


图14 更换导线对沿线电压特性的影响

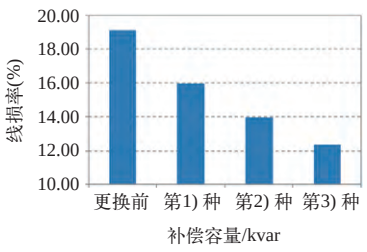


图15 更换导线对线损率的影响

由图14可知，更换导线的方式能令沿线电压特性趋于平缓，使节点电压不合格率大大减少，从而优化电压质量。而图15表明，更换导线的方式能较大程度地降低线损率，且导线截面积越大，线损率越小。但是采用此种节能改造措施需要注意的是低压配电网线路较长，如果大范围更换导线必然会提高经济成本，而且导线的截面积越大价格越高。因此不能盲目更换，需要落实好需求判断、效益评估等工作。

7. 综合节能改造措施效果

由上述对各个节能改造措施的分析可看出，单一使用某种措施都不能达到理想的效果，即便是对电压质量改善效果相对最好的更换导线措施中，也存在不合格节点电压的情况。因此，运用多种节能改造措施进行配合，对低压配电网的电压质量和线损率进行改善，可能会达到更优更理想的效果。

由上述对四种无功补偿措施的分析，离首端2/3处补偿80 kvar是相对较好的节能改造方式；逆调压只能对节点电压特性曲线整体提升，且线损率改善不明显；在10节点至5节点线路更换95 mm^{2}导线无论是对于电压质量或者线损率都是相对较佳的节能改造措施。因此选取了离首端2/3处无功补偿与在10节点至5节点线路更换95 mm^{2}导线两种节能改造措施配合使用。图16和图17分别为包括综合节能改造措施在内的不同措施对低压配电网电压质量和线损率改善效果的对比图。

从图16和图17中可以明显地看出，综合措施无论在电压质量方面或者线损率方面的改善幅度都要比单一措施高出一个等级。因此可以推知，只有合理地综合利用各种节能改造措施，才能充

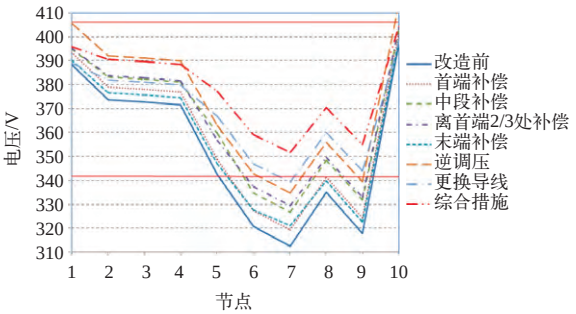


图16 不同节能改造措施对沿线电压特性的影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

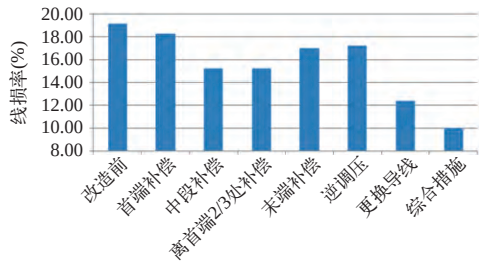


图17 不同节能改造措施对线损率的影响

分发挥低压配电网电压质量和线损率的改善潜力和空间。

低压配电网节能改造建议

低压配电网节能改造建议如下：

1）在实际低压配电网节能改造工作中，需要充分协调多方面因素，如规划的合理性、需求判断及经济成本与效益的关系等。本文主要研究的是节能改造措施对电压质量和线损率的影响，因此并未充分考虑经济因素。

2）在电能质量备受关注的当代，低压配电网节能改造措施不仅仅要考虑线损率的问题，还要着眼于改善其沿线电压特性。这是由低压配电网沿线电压特性复杂、电压质量相对中高压配电网要差决定的。

3）对于沿线路的无功补偿方式，在补偿地点方面，分散多点补偿具有更加良好的电压质量改善和节能效果，但是补偿点并不是越多越好，一般不宜超过3个；在补偿容量方面，也不宜过大，否则会导致电压波动甚至无功倒送的现象。

4）综合运用多种节能改造措施要比单一措施效果好。实际工作中应优先考虑运用更换导线和无功补偿措施，逆调压作为辅助手段，共同对低压配电网进行节能改造。

结束语

本文对某低压配电网沿线路无功补偿、逆调压、更换导线等单项以及综合节能改造措施对其沿线电压特性和线损率的影响进行了直观充分的静态比对分析。结果证明单一措施中更换导线的效果相对较好，综合运用多种措施才能最大化地改善低压配电网沿线电压特性和线损率。算例表明本文的计算分析方法能良好地用于分析低压配电网相关实际问题，具有工程参考价值。

参考文献

[1] Mekhamer S F，Soliman S A，Moustafa M A，et al．Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2003 (5)．

[2] 杨玺．提高配电网电压质量方法研究 [J]．电工技术，2011 (6)：27-32．

[3] 刘治新．关于改善农网电压质量与降低线损措施的探讨 [J]．中国新技术新产品，2010 (23)：143-144．

[4] 孔舒红．配电网节能降损的技术措施分析 [J]．电气时代，2014 (1)：59-61．

[5] 刘志凌．改善农网电压质量的措施 [J]．大众用电，2005 (3)：34-35．

[6] 白先红，张勇军，陈艳，等．配电网电压改善潜力的静态评估与应用 [J]．现代电力，2014 (3)：29-33．

[7] 李朝顺．配电网沿线路分散无功补偿的实例分析与计算 [J]．电力勘测设计，2012 (4)：56-60．

（收稿日期：2015－02－10）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net