

# 配电网电压改善潜力的静态评估与应用

白先红<sup>1</sup>, 张勇军<sup>2</sup>, 陈艳<sup>2</sup>, 韦任佳<sup>3</sup>

(1. 广西电网公司计划发展部, 广西南宁 530023; 2. 华南理工大学电力学院, 广东广州 510640;

3. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东广州 510640)

## Static Assessment of Voltage Improving Potential and Its Application to Distribution Systems

BAI Xianhong<sup>1</sup>, ZHANG Yongjun<sup>2</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, WEI Renjia<sup>3</sup>

(1. Plan & Development Dept., Guangxi Power Grid Company, Nanning 530023, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangzhou Power Electric Technology Co. Ltd, Guangzhou 510640, China)

**摘要:** 为了实现对改善配电网电压的需求判断的评估, 提出了配电网电压改善潜力的概念、评价指标及其定量评估体系。以配电线路主干线路末端节点作为评估点, 末端电压幅值作为判据, 在典型方式静态潮流下, 计算通过适当的技术措施所能取得的电压改善率, 视为电压改善潜力。基于微观(配电线路)-宏观(规模配电网)模式建立电压改善潜力评估体系, 采用分散微观计算与集中宏观评估模式, 通过对分类典型线路在不同措施下的电压改善潜力的静态分析, 对规模配电网总体电压改善潜力进行定量评估, 实现了配电网规划、运行与管理领域对电压优化的宏观量化评估。算例表明, 多种措施综合运用才能充分挖掘线路的电压改善潜力。

**关键词:** 配电线路; 配电网; 分散微观计算; 集中宏观评估; 电压改善潜力

**Abstract:** In order to assess demand judgment of distribution networks voltage, the concept, evaluation criteria and quantitative evaluation system of distribution networks voltage are presented to improve voltage potential of distribution networks in the paper. The nodal at the end of the trunk feeder of distribution lines is used as assessment node, and its voltage profile is regarded as a criterion. The voltage improving potential is calculated by suitable technique and measures under the static load flow of typical operation mode, which is defined as the voltage improving potential. The assessment system of voltage improving potential is proposed based on micro-macro (distribution lines-large-scale distribution network) model. Taking the mode of distributed micro calculation and centralized macro assessment, by stat-

ic analysis on voltage improving potential of classified typical lines under different measures, total voltage improving potential of distribution networks is assessed quantitatively. The proposed method can be used to realize the macro quantitative evaluation for voltage optimization within the planning, operation and management domain of distribution systems. Example shows that the comprehensive application of a variety of measures can fully tap voltage improving potential of lines.

**Keywords:** distribution networks line; distribution systems; distributed micro calculation; centralized macro assessment; voltage improving potential

## 0 引言

随着电能质量问题的备受关注, 电能质量综合评价问题已经得到许多研究人员的重视<sup>[1-3]</sup>。配电网作为面向用户的电能输出终端, 在当前社会愈发重视供电服务水平的大环境下, 对电能质量的管理也随之愈加严格, 特别体现于对配电电压质量的追求。配电线路首端接于上级系统, 一般电压较稳定; 而线路末端电压受线路参数及所接用户的不可控影响, 往往严重偏离正常电压范围<sup>[4]</sup>。过高或过低的配电电压不仅威胁电网安全, 而且危害用户设备正常运行, 是用户诟病供电服务的最常见原因。

为改善配电网电压质量, 供电企业先后应用了多种技术措施, 包括线路无功补偿、电缆化改造、安装调压器、AVC 闭环调节、引入分布式电源等<sup>[4-9]</sup>。在显著提高了配电电压的整体水平的同时, 也凸显了电压改善需求判断不准、项目规划不明、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51377060); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013ZM0013)

措施成效不清等问题,存在地区间设备闲置与稀缺共存、投入与电压改善效益不匹配的现象<sup>[8]</sup>。究其原因,在于缺乏对配电网电压改善潜力的准确把握和高效挖掘。

本文借助配电网节能潜力评估计算软件 PSAS<sup>[10]</sup>,采用分散微观计算与集中宏观评估模式,通过对分类典型线路不同措施电压改善潜力的静态分析,实现对规模配电网总体电压改善潜力的定量评估。

## 1 电压改善潜力

### 1.1 电压改善潜力的定义

我国配电电压质量管理规定,10kV 配电线路负荷侧电压在 9.3~10.7kV 范围内为合格,否则为越限。由于配电线路首端电压的调控能力较强,通常能够维持在 10.0~10.7kV 范围内,则当末端节点电压质量合格时,全线负荷节点电压一般都是合格的(除非极个别接线特殊的情况);而只要末端节点电压不合格则表明该线路需要采取手段来改善电压质量。因此,从供电服务的角度考虑,本文认为配电主干线路末端节点的电压质量对整条线路的电压质量最具代表性,因此选择主干线路末端节点作为评估点。根据线路电压变化的物理机理,配电线路末端电压越限主要呈类线性的越上限和越下限两种模式,线路末端电压的改善更能促进沿线电压改善。

本文提出 10kV 配电线路电压质量改善率  $U_1\%$ ,表征电压质量改善潜力和空间。在静态潮流背景下,以某项技术措施(或多种措施)实施后对主干线末端节点电压改善量(因越限形式不同,这个改善量可能是提升值,也可能是降低值)与实施前该节点初始电压值  $U_0$  之比的百分数表示,计算公式如下:

$$U_1\% = \begin{cases} \frac{|U_1 - U_0|}{U_0} \times 100\% & U_0 \notin (10.0, 10.7\text{kV}), \\ & U_1 \in (10.0, 10.7\text{kV}) \\ 0 & U_0 \in (10.0, 10.7\text{kV}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_1$  为电压调控后的主干线末端节点电压。这里,把主干线末端节点初始电压处在 10.0kV~10.7kV 视为理想的范围,若现状已经在该范围内,则无需采取电压调控措施来改善,故此时  $U_1\% = 0$ ;只有初始电压不在该范围的情况(一种是因轻载、接有大量小水电等分布式电源导致主干线末端

初始电压  $U_0$  越上限;一种是因重负载水平导致  $U_0$  低于 10.0kV)才认为需要采取电压调控措施,且调控后必须满足  $U_1 \in (10.0, 10.7\text{kV})$  这个理想范围,才计算改善率( $U_1\% > 0$ )。

单一技术措施的电压质量改善率  $U_{1j}\%$  可以定量评估某条配电线路在特定潮流下的电压改善潜力,而当  $n$  个技术措施同时使用时,该线路的微观综合电压改善潜力  $U_{1m}\%$  可表示为

$$U_{1m}\% = \sum_{j=1}^n \alpha_j U_{1j}\% \quad (2)$$

式中:  $U_{1j}\%$  表示措施  $j$  单独起作用时的电压质量改善率;  $\alpha_j$  为相应的耦合折扣系数,用于剔除不同措施同时使用带来的电压改善效应的重叠部分。工程实际中,使用 PSAS 软件可将多项技术措施同时建模纳入潮流计算,通过前后潮流结果对比得出线路综合电压质量改善潜力  $U_{1m}\%$ ,故(2)式一般仅作理论分析用。由多条配电线路为单元形成的规模配电网,其宏观的综合电压质量改善潜力用  $U_{1s}\%$  表示,具体分析见后文。

### 1.2 电压改善的技术措施

为消除某一配电线路末端的电压越限,实现上述电压质量改善效果,挖掘规模配电网的电压质量改善潜力,通常使用以下技术措施。

① 缩小供电半径。通过在负荷中心附近新增电源点,缩小重载线路供电半径,可以减小线路阻抗,降低线路的压降,达到改善全线路所有负荷节点的电压水平的目的。配电网是否要考虑增加电源点以缩小供电半径,是一个需要综合权衡的问题,通常在线路供电半径显著超过规定要求并造成电压质量、功率损耗、供电可靠性等方面诸多问题时才会考虑。

② 增加无功补偿。无功功率对系统电压水平起决定性影响,而增加无功补偿也是配电线路应用最为广泛的电压调节措施。线路电压损耗  $\Delta U \approx \frac{PR+QX}{U}$ ,如果无功输送量较大,则线路电压损耗也会大增;通过在负荷侧进行无功补偿,则可以减小电压损耗分量  $QX/U$ ,达到改善电压质量的效果。

③ 增大导线截面或电缆化改造。增大导线截面或者对一些架空线路进行电缆化改造,可以减小线路的输电阻抗,使线路的电压损耗有效降低。架空线路更换大截面的导线,主要是减小电阻以及由电阻产生的电压损耗分量,而结合城市电网建设需

求进行电缆化改造，可以同时减小电阻和电抗以及由阻抗产生的两部分电压损耗分量，其电压质量改善效果一般更明显。

④ 采用逆调压方式。线路电压损耗与运行电压水平成反比，线路重载时电压损耗大，可能导致末端节点电压越下限，此时适当提高母线电压可以降低电压损耗，线路末端电压也会随着母线电压的提高而提高；线路轻载时电压损耗小，在线路容升效应作用下，为使末端电压不越上限可调低首端母线电压。

⑤ 其它。诸如 AVC 系统的应用及升级改造、采用自动调压器、负荷侧增加分布式电源、10kV 线路升压改造等措施，是在配电网层面进行系统级电压改善的有效措施，限于篇幅不详述。

## 2 电压质量改善潜力评估方法

经过上述分散微观分析，每种措施都可以在配电网线路中起到不同程度的调压效果，全部调压措施总的电压改善率被视为综合电压改善潜力。在评价地区规模配电网电压质量总体水平，或进行规模配电网电压质量改善规划及方案制定时，全网的综合电压改善潜力将极具指导意义。

进行规模配电网综合电压改善潜力评估，可首先根据线路的负荷特性、主干长度、导线类型和无功电压特性等将整个配电网分为若干类配电线路，然后对每一类配电线路选择若干条代表性典型馈线进行 PSAS 建模，逐一进行系统化电压改善潜力评估，最终根据微观线路评估结果与该类型线路在电网中的比重来定量评估地区配电网的综合电压改善潜力。类似于文献 [10] 节能评估的做法，融合分散微观计算与集中宏观评估的综合电压质量改善评估体系如图 1 所示。

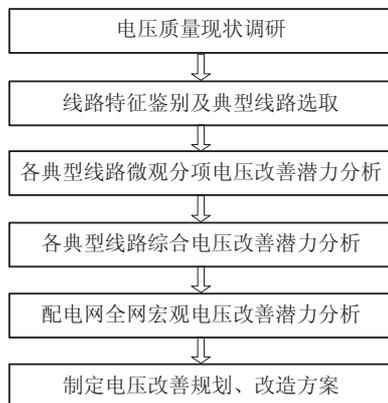


图 1 综合电压质量改善评估流程

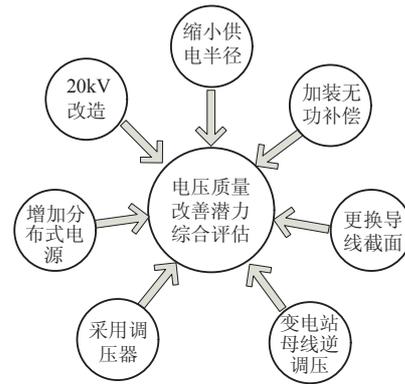


图 2 综合电压质量改善评估架构

根据国内配电网的负荷特性和无功电压特性，一般可将配电线路分为 5 类，即城区线路、工业区线路、城镇线路、农村线路、山区线路。城区线路代表具备城市负荷中心特点的线路，一般电缆化率高，供电半径较短，线路负载率较高，负荷波动剧烈；工业区线路一般供电半径较短，线路长期重载运行，负荷相对稳定，电压偏低；城镇线路一般以架空线为主，供电半径偏长，负载率轻重不一；农村线路基本为架空线，供电半径较长，支路较多，线路末端电压长期偏低；山区线路，主要表现为供电线路长，负荷低，受小水电影响丰水期间电压越上限而枯水季节电压越下限等。

按照上述分类选取最具代表性的若干条典型配电线路作为评估样本，采集线路、设备参数及负荷分布参数，在 PSAS 软件中以年度典型大方式和小方式分别进行建模及微观线路综合电压质量改善率计算。在获得所有样本的综合电压质量改善率数据后，即可按下述公式计算全网宏观的电压质量改善潜力。

$$U_{I-nr-av} \% = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_{I-nr-i} \% \quad (3)$$

式中： $U_{I-nr-av} \%$  表示该地区某类配电线路的平均综合电压改善潜力； $k$  为该类样本线路的条数。

$$U_{I-s} \% = \sum_{i=1}^5 \lambda_i U_{I-nr-av-i} \% \quad (4)$$

式中： $U_{I-s} \%$  即为该地区配电网的宏观综合电压改善潜力，表征该地区配电网电压运行和管理的整体水平与改善空间； $\lambda_1 \sim \lambda_5$  表示 5 类配电线路在该地区配电网中各自所占的份额， $U_{I-nr-av-1} \% \sim U_{I-nr-av-5} \%$  为该类线路相应的平均综合电压改善潜力。

### 3 评估的工程应用

基于微观配电线路的电压改善潜力评估,主要用于指导配电线路进行技术可行、高效经济的改造与运行电压优化。针对某一具体配电线路,根据 $U_{1-m}\%$ 判断预期可挖掘的综合电压改善空间后,可进一步分析每一项技术措施的电压改善效率,即其 $U_1\%$ 与经济成本的比值,据此优选电压改善效率最高的措施,或优化组合多种措施投入应用,应用方案的模拟可在PSAS软件中实现。

需要指出的是,在各项技术措施中,AVC系统的应用与升级改造也是为了实现线路的自动逆调压,效果视为等同,因此二者在评估与应用中不重复考察;此外,在配电网负荷侧增加分布式电源、10kV线路升级改造等措施,虽然对改善电压质量效果显著,但前者往往是供电企业以外的社会客体投资行为,后者则涉及到电网发展的整体规划,一般不会以单一电压优化作为应用指向,在常规的电网技改与局部优化的相关评估中,此两种措施可不作考虑。

基于宏观规模配电网的电压改善潜力评估,是

用于评价配电网整体电压运行与管理水平的直观途径,可作为省、地级管理部门考核所辖区配电网运行管理绩效的主要指标之一。

### 4 算例

结合南方某地区配电网进行评估分析,依据上述分类选取了10条典型10kV配电线路作为样本,典型线路的分类方法如表1所示。

表1 典型线路分类表

线路类型	导线特点	线路主干长度 $L/\text{km}$
城区线路	电缆为主	$L \leq 3$
工业区线路	架空、电缆	$3 < L < 6$
城镇线路	架空为主	$6 \leq L \leq 10$
农村无源线路	架空为主	$L > 10$
山区含源线路	架空为主	$L \geq 15$

根据调研收资得到的数据,该地区配电网冬小方式下线路末端电压都是合格的,因此考虑以夏季大负荷方式为分析背景,所选取的10条典型线路的基本参数如表2。

表2 典型配电线路初始参数

线路	供电有功/ MW	供电无功/ Mvar	主干长度/ km	母线电压/ kV	末端最低 电压/kV	末端最高 电压/kV	线路类型	所占 比例/%
L1	1.725	0.804	2.80	10.20	10.10	10.45	城区	30
L2	1.777	1.152	2.61	10.30	10.20	10.53	城区	
L3	0.795	0.363	0.64	10.20	10.20	10.60	城区	
L4	5.677	1.539	4.01	10.10	9.67	10.41	工业区	20
L5	5.725	1.234	3.85	10.10	9.80	10.40	工业区	
L6	1.784	0.804	7.81	10.40	9.65	10.36	城镇	20
L7	5.711	2.072	6.10	10.10	9.20	10.20	城镇	
L8	1.891	1.163	17.90	10.30	9.20	9.80	农村	20
L9	0.511	0.278	4.25	10.30	10.10	10.50	农村	
L10	0.768	0.376	20.43	10.30	9.68	10.65	山区	10

上述抽样初步表明,该地区城区线路电压质量好,工业区、城镇、农村及山区线路均有电压越下限情况(已标粗),线路末端电压偏低是主要问题。经电压质量评估分析,上述线路基于多种措施的微观电压改善综合潜力评估结果如表3。计算表明,不同措施在电压改善中均能挖掘部分潜力,但多种措施综合应用才能充分挖掘线路的电压改善潜力。

据此,该地区规模配电网的宏观综合电压改善潜力为

$$U_{rs}\% = 0 + 0.2 \times 11.47 + 0.2 \times 6.24 + 0.2 \times 4.97 + 0.1 \times 5.15 \approx 5.57$$

可见,该地区配电网总体电压改善潜力约为5.57%,配电线路的微观电压改善综合潜力大体在0~15%之间,突出问题在于电压越下限。按照线路分类,有电压改善潜力的配电线路集中在工业区

和城镇线路，其次是农村和山区线路，城区线路基本无电压改善潜力。

表3 典型线路的电压改善综合潜力分析

$U_1\%$ 线路	缩小供电半径	增加无功补偿	更换导线截面或电缆化	逆调压	综合措施 (不包括缩小供电半径)		建议方案
	$U_{r-1}\%$	$U_{r-2}\%$	$U_{r-3}\%$	$U_{r-4}\%$	$U_{r-m}\%$	$U_{r-nr-av}\%$	
L1	0	0	0	0	0	0	无
L2	0	0	0	0	0	0	无
L3	0	0	0	0	0	0	无
L4	1.93	0.71	0.10	5.27	5.27	11.47	逆调压
L5	0	2.29	0	5.52	7.80	11.47	逆调压
L6	4.52	3.55	1.51	2.37	7.20	6.24	增加无功补偿和逆调压
L7	8.52	8.07	1.23	6.50	15.13	6.24	增加无功补偿和逆调压
L8	9.29	5.51	1.08	3.56	9.94	4.97	增加无功补偿和逆调压
L9	0	0	0	0	0	4.97	无
L10	5.46	1.96	0	3.30	5.15	5.15	增加无功补偿和逆调压

## 5 结束语

本文所提出的基于微观-宏观模式的电压改善潜力评估体系克服了规模配电网电压线路多、参数各异、结构复杂、耦合因素交错等困难因素，充分发挥了PSAS模型分析和统计概率分析的优势，首次实现了配电网运行与管理领域对电压优化的宏观量化评估，对配电线路和规模配电网均能快速准确地分析电压改善潜力并提出优选的应对方案，为配电网规划与改造提供科学依据。本文分析贴合实际，充分考虑了电压改善面临的客观限制和隐藏的挖掘空间，算例表明该体系能良好地用于实际问题分析，工程实用价值显著，在南方电网多个地区的评估研究工作中取得了有益的应用。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋金良, 袁金晶, 欧阳森. 基于改进隶属度函数的电能质量模糊综合评价方法研究 [J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(11): 107-112.
- [2] 欧阳森, 石怡理, 刘洋. 基于双激励控制线的区域电网电能质量动态综合评价方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(12): 205-210.
- [3] 欧阳森, 廖一键, 刘洋, 等. 基于自主式决策的综合评价方法在电能质量领域的分析与运用 [J]. 电网技术, 2012, 36(2): 70-74.
- [4] 苏剑. 改善城市电网客户端电压质量的技术实践 [M].

江苏省电机工程学会输配电及电力系统学术会议, 2004, 11.

- [5] 杨玺. 提高配网电压质量方法研究 [J]. 电工技术, 2011(6): 27-29+32.
- [6] 裴玮, 盛鹏, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
- [7] 陈根永, 张新民, 孙启伟. 农网规划建设配网电压等级的选择分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 119-123.
- [8] 张裕清, 徐今强. 提高城市中压配网电压等级的必要性和应注意的问题 [J]. 电气应用, 2007, 26(1): 136-138.
- [9] 杨广杰, 郑华. 含分布式电源的配电网电压无功优化问题研究 [J]. 现代电力, 2012, 29(2): 27-31.
- [10] 张勇军, 石辉, 许亮. 配电网节能潜力评估系统开发方案 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 51-55.

收稿日期: 2013-08-13

作者简介:

白先红(1976—), 女, 工程师, 从事电网规划工作, E-mail: bai\_xh@gx.csg.cn;

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为电力系统无功优化规划与控制、电力系统可靠性等, E-mail: zhangjun@scut.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)