

[配电网]

电网精准投资下的中压优质电压规划项目优选研究

文/黎清姚 王延杰 何振邦
广州锐兴科技有限公司

提出一种适用于中压配电网的优质电压规划项目优选方法。首先结合现有电压治理措施，分析试点县区配电网电压质量问题及原因，提出优质电压治理规划方案；然后提出优质电压项目优选模型与评估流程；最后通过优质电压项目优选模型找出影响电压质量的关键因素，实现中压配电网优质电压规划项目优选。

近年来，在国家经济形势持续向好和有利的政策作用下，企业生产和人民生活对供电能力和供电质量提出了更高要求，配电网电能质量迎来新的挑战和需求。为贯彻党的十九届五中全会精神，电网公司亟待提升配电网电压质量水平，进一步优化电力营商环境，提升配电网投资效益。

传统配电网项目排序以增供电量、解决现有问题紧迫程度等指标作为参照，没有考虑解决措施难度、实施周期等问题，由于其存在运行特性复杂、运行条件各异等特点，目前配电网的规划技术体系缺乏一些科学有效的评估和优选方法，导致在投资效益方面的考虑有所欠缺。配电网建设改造项目采取先定资金、后定项目的方式制定投资计划，缺乏一套适用的方法评价投资的可行性和投资收益的合理性。对配电网的投资效益进行评估研究，开展中压配电网优质电压项目评估，对于提高电力系统可靠性、降低功率损耗、提高电能质量、扩大电能的经济效益、提高投资精准度和提升营商环境等具有重要意义。

以G市、R县、H县为试点分析对象，对“十四五”配电网规划中2023—2025年的规划项目，通过优质电压项目优选方法，结合理论分析配电网电压波动，找出影响电压质量的关键因素，对

规划项目的电压治理效果进行量化排序，实现中压配电网优质电压规划项目优选，为研究电压质量提升方法提供理论支撑，从而为配电网电压质量规划提供技术指引，提升区域配电网的电能质量。

配电网电压治理措施

1. 配电网电压质量问题及原因分析

根据试点县区“十四五”配电网规划统计数据，2022年，试点县区最低电压低于额定电压7%以上的线路有22回，占比6.55%；存在电压偏低（<180 V）台区123个，占比2.40%；电压偏低（180~198 V）台区894个，占比17.46%。通过分析，试点县区配电网电压质量问题主要由以下原因导致。

1) 由于试点县区地区发展不均衡，线路及配变负荷分布不均，线路供电半径过长，导致中压线路末端电压偏低。

2) 由于建设初期资金欠缺部分线路及配变没有配备无功补偿设备，造成无功功率在配电网线路上传输，增加了电压损耗，导致末端电压不合格。

3) 部分配变和线路容量（线径、配变容量等）偏小，不能满足负荷增长需求，部分网区内设备残旧损耗大，导致中压线路末端电压不合格。

4) 负荷增长过快或分布不均, 公站布点无法深入负荷中心, 低压线路迂回供电, 低压线路过长; 供电范围过大, 导致负荷过重, 末端用户电压质量难以保证。

2. 配电网优质电压治理措施

1) 对于负荷分布不均、供电半径过长的中压线路, 可以从该线路所在变电站或其他变电站新建一回或多回10 kV线路与该线路连接, 转接该线路部分或全部负荷, 从而优化该线路的负荷分布, 缩短该线路的供电半径, 解决线路末端电压偏低的问题; 对于重过载的配变, 新建一台或多台配电变压器转接该台区负荷。

2) 对于没有配备无功补偿设备且功率因数不满足规范要求的中压线路及配变, 可以采用变电站集中补偿、配变低压集中补偿方式、中压线路杆上无功补偿、用户终端分散补偿等。

3) 对于线径、配变容量无法满足负荷增长需求的线路、配变, 采取换大线径、配变增容的方案改善中压线路的电压。

4) 对于负荷增长过快或分布不均、线路迂回供电, 采取新建线路或配变、优化中压网架等措施改善配电网电压质量。

5) 安装调压装置、合理接入分布式电源等其他措施。

优质电压项目优选方法与评估流程

1. 项目优选评价指标

1) 治理效果指标 (Z_i)。包含解决低电压用户数和电压提升幅值两个子指标。其中治理效果等于解决低电压用户数与电压提升幅值的乘积; 治理效果的最大值赋100分, 最小值赋0分, 其他规划项目的治理效果指标评分为

$$Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

2) 单位用户投资指标 (D_i)。表示为综合投资费用与预期解决的低电压用户数之比。单位用户投资最小值赋100分, 最小值赋0分, 其他规划项目的单位用户投资指标评分为

$$D_i = \frac{X_i - X_{\max}}{X_{\min} - X_{\max}} \times 100 \quad (2)$$

3) 可操作性指标 (K_i)。根据可操作性的难易

程度, 各措施可划分为5个等级: 无功补偿100分; 加装调压器、负荷转接、接入DG80分; 更换线路 (小于1 km)、新建台区60分; 更换线路 (1~5 km) 40分; 更换线路 (大于5 km) 20分。

4) 实施周期指标 (S_i)。根据实施周期的长短, 划分为以下5个等级: 小于1个月100分; 1~3个月80分; 3~6个月60分; 6~12个月40分; 大于12个月20分。

2. 电压波动计算分析方法

(1) 计算数学模型

1) 中压线路。由于中压配电网三相不平衡问题不突出, 故建立中压线路数学模型时, 可以将三相线路简化为单相线路, 根据π形等效电路原理, 建立中压线路等效电路, 如图1所示。

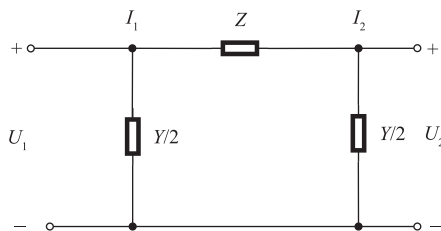


图1 中压线路等效电路

其中, 阻抗由电阻 R 和电抗 X 组成, 即 $Z=R+jX$; 导纳可忽略不计。

2) 配电变压器。中压线路中的配电变压器为双绕组变压器, 因此配电变压器的等效电路如图2所示。

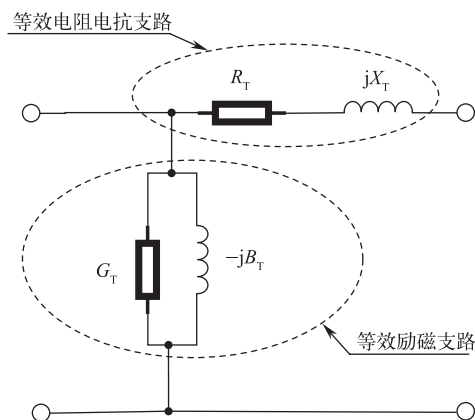


图2 双绕组变压器等效电路

变压器等效电路中的4个参数: 配变高低压绕组的总电阻 R_T 、配变励磁支路的电导 G_T 、电抗 X_T 、电纳 B_T 可从变压器的铭牌中的4个数据计算得出, 其

计算公式分别为

$$R_T = \frac{P_K U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (3)$$

$$X_T = \frac{U_X \%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \quad (4)$$

$$G_T = \frac{P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$B_T = \frac{I_0 \% \sqrt{3} I_N}{100 U_N} = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中, P_K 为短路损耗; $U_X\%$ 为短路电压百分值; P_0 为空载损耗; $I_0\%$ 为空载电流百分值; S_N 为变压器的额定容量; U_N 为变压器的额定电压。

3) 并联电容器。并联电容器在配电网中能够减少无功潮流, 降低电压损耗和功率损耗, 中压线路的等效电路如图3所示。

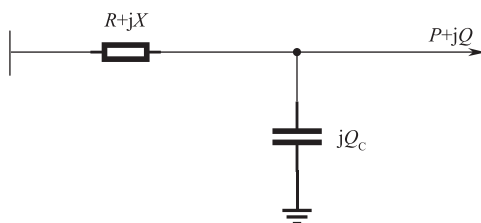


图3 中压线路等值电路

无功补偿方式就是在配电线路的杆塔上、配电变压器低压侧或用户侧安装并联电容器并进行无功补偿, 以提高配电网功率因数, 降低线路电流, 达到减少线损、提高电压的目的。

(2) 电压降落模型

$$\dot{U}_1 = (U_2 + \frac{PR+QX}{U_2}) + j(\frac{PX-QR}{U_2}) \quad (7)$$

$$\Delta U = \frac{PR+QX}{U_2} \quad (8)$$

$$\partial U = \frac{PX-QR}{U_2} \quad (9)$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\partial U)^2} \quad (10)$$

式中, U_1 为线路首端电压幅值; U_2 为线路末端电压幅值; ΔU 为电压纵向分量; ∂U 为电压横向分量, 一般比较小, 可以忽略; P 、 Q 为线路末端的有功功率和无功功率; R 、 X 为等效电路的电阻和电抗。

中压线路电压降落的本质在于: 负荷在一段时间内有功功率和无功功率与配电网阻抗乘积之和, 而影响到负荷量变化的主要因素包括负荷分布、负荷率、

无功补偿、DG接入和网架参数五个方面。

3. 优质电压项目优选模型

采用层次分析法对试点区域规划项目、评价指标和实施效果进行层次化系统分析, 通过定性指标和模糊量化方法计算各规划项目的综合得分并排序, 解决项目优选决策问题。

(1) 层次结构建立

目标层: 项目实施效果。

评价指标层: 治理效果指标、单位用户投资指标、可操作性指标和实施周期指标。

待评价项目层: 规划项目。

(2) 判断矩阵建立

根据评价指标的相对重要程度, 采用九级标度法为判断矩阵的要素赋值, 其相对重要程度量化表见表1。

表1 相对重要程度量化表

相对重要程度	量化数值
同样重要	1
略重要	3
较重要	5
重要得多	7
重要得多	9
重要性处于以上结果之间	2、4、6、8

根据评价指标层相对于目标层的重要程度, 构造两两比较的判断矩阵 E , 矩阵中具体数值可以根据专家意见及地方规划要求灵活调整。

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1n} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, e_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标的相对重要性标度, $e_{ij} > 0$, $e_{ii} = 1$ 且 $e_{ij} = 1/e_{ji}$; n 为该层级的指标数量, 本文指标数量为4, 所以 $n=4$ 。

(3) 判断矩阵的一致性检验

两两对比会出现判断不一致的情况, 根据判断不一致的判断矩阵算出来的特征向量, 使人得出错误的结论。因此, 需要对判断矩阵进行判断一致性检验。为此, 计算一致性指标 CI , 其定义为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (12)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中， $\lambda_{\max}$ 表示最大的特征值，根据矩阵特征值求解公式 $|\lambda I - E| = 0$ （ I 为单位矩阵）求得； RI 表示平均随机一致性指标，只与 n 有关， RI 的取值见表2。

表2 平均随机一致性指标 RI 数值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46

当 $CR < 0.1$ 时，即可认为判断矩阵的一致性达到了要求。否则，需要对评价指标层相对于目标层的重要程度重新赋值，直至通过矩阵一致性检验。

(4) 项目优选排序

计算待评价规划项目的得分并排序。其计算公式为

$$F_i = (Z_i, D_i, K_i, S_i) \times \omega \tag{14}$$

式中， Z_i 为治理效果指标得分； D_i 为单位用户投资指标得分； K_i 为可操作性指标得分， S_i 为实施周期指标得分； ω 为评价指标权重， $\omega = (0.669, 0.179, 0.076, 0.076)$ 。

4. 优质电压评估流程

1) 收集规划项目的计算参数，包括规划方案、馈线单线图、馈线首端功率和电压数据、各配变功率和电压数据、低电压用户的电压幅值。

2) 根据规划项目方案、计算数学模型和单线图的关系，建立项目实施治理效果计算简化模型：保留对电压变化量有影响的部分，其余分支线及其负荷分别等效成保留部分的一个负荷。

3) 在此基础上，从保留部分首端出发，利用电压降落模型，按逐步往后，计算规划方案实施前后各个保留节点的电压幅值变化量。

4) 通过保留节点的电压幅值变化量，推算低电压用户的电压幅值变化量，结合低电压用户历史监测电压值，判断是否解决了电压问题。

5) 通过优质电压项目优选模型求出待评价规划项目的得分并对其进行排序优选。

配电网优质电压规划方案分析

三个试点区县中压优质电压规划项目共计40个，根据收集的规划项目的数据，通过数学模型计算出规划项目解决低电压用户数以及电压提升幅度，最后通过优质电压项目优选模型求出待评价规划项目的得分并对其进行排序优选。

试点区县共解决31 134户低电压问题，其中，一类项目解决低电压用户数为23 052户，二类项目解决低电压用户数为7 765户，三类项目解决低电压用户数为317户，见表3。

表3 解决低电压用户数分类

分区	解决低电压用户数/户			
	一类	二类	三类	合计
合计	23 052	7 765	317	31 134
G县	2 797	3 344	0	6 141
R县	0	4 421	0	4 421
H县	20 255	0	317	20 572

对项目实施前后的实际电压提升幅值进行统计分析，见表4。

表4 按电压提升幅度效果分析

区域	电压提升幅度/kV	项目数量/个	占比 (%)
合计	0~0.3	19	47.50
	0.3~0.6	14	35.00
	0.6~1	5	12.50
	1以上	2	5.00
G县	0~0.3	3	25.00
	0.3~0.6	9	75.00
	0.6~1	0	0.00
	1以上	0	0.00
R县	0~0.3	0	0.00
	0.3~0.6	1	20.00
	0.6~1	2	40.00
	1以上	2	40.00
H县	0~0.3	16	69.57
	0.3~0.6	4	17.39
	0.6~1	3	13.04
	1以上	0	0.00

试点区县总体电压提升幅度在0~0.3 kV的项目占比最多，提升1 kV以上的项目数量占比最少，见表5。

G县和R县的操作手段主要是新建线路，三个地区在解决低电压用户数上，增大导线截面积操作方式解决的低压用户数最多，从投资效益来看，新建线路小于5 km的效益好于新建线路大于5 km的操作方式，增大导线截面积的导线长度越短，效益越好。

表5 按操作手段分析提升效果分类

区域	操作手段	解决低压 用户数/户	电压提升 幅度/kV	单位用户投资 /(万元/户)
G县	新建线路<5 km	6 141	0.4	0.14
	合计	6 141	0.4	0.14
R县	新建线路<5 km	1 907	0.6	0.05
	新建线路>5 km	2 541	1.3	0.24
	合计	4 081	1	0.16
H县	增大导线截面 <5 km	9 181	0.1	0.06
	增大导线截面 >5 km	11 391	0.4	0.17
	合计	20 572	0.3	0.12
总计		31 134	0.4	0.13

1) 从投资效益来看。中压线路由于重过载导致的末端低电压, 优先考虑附近中压线路转供负荷的方法, 其次考虑扩大导线截面积, 如果还不能解决, 考虑新建线路拆分负荷。

2) 从投资效益来看。中压线路由于线路过长导致的末端低电压, 优先考虑优化运行方式和转接负荷, 缩短供电半径的方式。对于影响负荷数量多的情况, 如有邻近35 kV变电站, 考虑35kV配电化, 否则针对110 kV变电站进行新出线。

3) 无功补偿和现有中压线路的负荷转移操作较为简单, 操作时间相对较短, 因此当需要紧急解决重要用户低电压的时候可以考虑利用该方法。

通过项目优选排序表可得到规划项目指标评分的主要影响因素, 对于排名靠后或治理效果未满足要求的规划项目, 调整规划方案后通过优质电压项目优选模型重新计算排序, 对比调整规划方案前后项目的排序, 实现规划方案的对比分析, 从而为配电网电压质量规划提供技术指引, 提升区域配电网的电能质量。

结束语

试点地区供电局的电压质量问题包含: 线路及配变负载分布不均、线路供电半径过长, 造成中压线路末端电压低、线路及配变无功补偿容量偏低, 部分设备陈旧、运行年限过长, 造成损耗高及降低供电可靠性, 电压损耗较大等问题。

本文通过探讨试点区域的供电电压质量问题, 以提高配电网规划的精准性为目标, 基于电压波动计算分析, 建立了包含治理效果指标、单位用户投资指标、可操作性指标、实施周期指标等的评价体

系, 采用目前广泛应用的层次分析法进行权重计算, 可以切实评估规划项目实施效果和排序, 实现中压配电网优质电压规划项目优选, 为研究电压质量提升方法提供理论支撑, 对实际配电网项目规划决策评估提供指导意义。

配电网低电压问题是一个综合性的动态问题, 需要长期跟踪监测、统计、分析与应对处理。随着智能电能表、电网在线监测装置等智能化设备的推广应用, 以及新能源渗透率的不断提高, 电网业务数据将从时效性层面进一步丰富和拓展, 而电网数字化转型的加速推进, 使得电网系统的营销、配电、调度业务数据逐步实现融合贯通, 为有效治理和解决配电网低电压问题提供更加充分有力的数据信息, 从而满足不断提高的供电质量需求。EA

(收稿日期: 2023-03-13)

参考文献

[1] 于宝鑫, 李大兴, 李佳骥, 等. 城市配电网综合评价体系建设探究[C]//. 2018智能电网信息化建设研讨会论文集. 2018: 279-281, 285.

[2] 吴鸿亮, 李东伟, 王玲. 配网投资成效动态评价体系[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 44-49.

[3] 汪颖翔, 方仍存, 张籍, 等. 配电网投资决策体系研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 56-62.

[4] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.

[5] 杨博, 贾博, 姜万超, 等. 基于单位成本效用的配电网电压合格率治理评价[J]. 电工技术, 2020(11): 60-62, 70.

[6] 刘善伟, 郭建龙, 刘文泽, 等. 10 kV配电网电能质量综合等级评估方法研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 152-156.

[7] 甄超, 张健, 季坤, 等. 电能质量治理设备运行状态识别及其治理效果评价[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 60-65.

[8] 李斌, 刘群英. 冲击性负荷接入220 kV电网的电能质量治理应用研究[J]. 电气应用, 2022, 41(11): 16-22.