

配电网低压电能质量问题的评估与 应对策略

刘 飞 赵海玲 刘冬季

(国网宁夏电力有限公司宁东供电公司)

摘要：电压质量是衡量电能质量优劣的重要指标之一，不仅影响着广大用户用能体验，也关系供电公司的服务质量。随着分布式新能源的快速发展及国家对居民用电问题的日益关注，低压配网线路低电压问题的治理迫在眉睫，本文针对配电网低电压的产生机理、影响及治理措施进行详细分析，为配网线路治理低电压问题提供了思路。

关键词：配电网；低电压；电能质量；无功补偿

0 引言

随着分布式新能源的快速发展及大量并网，电力监管部门对供电服务指数及相关指标的考核力度愈演愈大，而供电公司将承受巨大的供电服务压力，电能质量问题再次引发广泛关注^[1-3]。稳定及安全的电力供应是城市用户正常用电以及安全用电的根本保障。在我国城镇实际的电力供应过程中，普遍存在低电压现象。而电压降低会产生一定的危害：一是在电能计量方面，电压降低会导致电能表的读数不准，从而影响计量结果；二是在线损方面，电压降低会使得供电线路电流增大、功率因数下降，从而导致线路损耗的增加，增加供电企业的经济负担^[4]，因此研究如何进一步抑制电压降低不仅可以提高供电服务质量，还能更大地节省电力能源。

1 低电压产生的机理及影响

1.1 低电压产生的机理

从严格意义上讲，影响电能质量的因素主要包括电压、频率、波形。从普遍的角度上来谈电能质量主要包括电压质量、电流质量、供电质量，而站在用户用电用能的角度上谈电能质量就可以理解为，导致用户用电设备不能正常工作或者运转的电压、电流或者频率的偏移，其中就包括电压偏移、频率偏移、电流偏移、三相不平衡、电压波动、瞬时过电压等现象^[5]。其中低电压的现象较为明显，关于低电压的形成原因可以用图 1 来进一步分析。由图 1 可知台区电压降落可以表示为 $U_2=U_1-\Delta U=U_1-I(R+J_x)=U_1-(I_{有}R-I_{无}R)$ ，进而可以得出，影响台区电压降落的因素主要由以下几个方面组成：一是配电线路距离较远导致阻抗（ R 和 J ）较大。二是由于配电台区中的大用电负荷用户位于配电线路末端；三是由于 $I_{有}$ 增大，即有功功率增大，用电负荷增加。四是由于 $I_{无}$ 增大，无功功率

增加，功率因数降低。

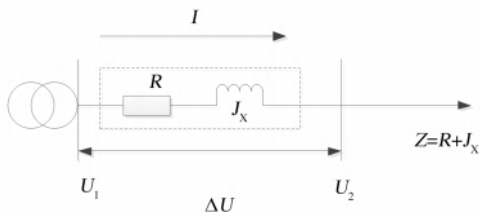


图1 配电线路简易图

1.2 台区低电压对电能计量的影响机理

低电压对电能采集的影响主要表现在供电线路上电流、电压、频率及波形的变化引起电能表参数的变化，其影响过程较为复杂。当供电线路的电压进一步降低时，此时线路电流增大，阻抗变小，由于供电线路中始终包含电感和电容元件，而电感和电容元件作为电能的储能元件，当供电线路电压降低时，储能元件释放电能的速度会进一步发生变化，从而导致电能表机械指示位置会发生变化，从而影响计量精度^[4-5]。目前的电能表计分为机械式、智能式和电子式电能表，通过低电压对电能表的影响机理分析可以得知，机械式电能表受电压波动最为明显，电子式次之，而智能式电能表受电压降低影响最小，这主要是受电能表机械结构不同而产生的^[4]。

1.3 台区低电压对电力系统的影响

由于输电线路电压降低后，输电线路的输电容量会进一步受到影响，因而降低了电力系统有功输出的稳定特性，若电压进一步降低，会产生电压崩溃^[6]。而电力系统的无功补偿若得不到有效弥补，则会进一步加剧系统电压降低，导致电压降低的趋势更加恶化^[6]，而系统无功补偿主要依赖于电压无功补偿控制来得以实现。目前，低压配网侧电压无功控制主要存在以下问题：①配电网采用树形、多分支的单向辐射型供电方式。部分单向辐射线路供电半径长，功率因数低，线路损耗大，末端电压质量差；②地区内农村灌溉使用大量水泵，负荷较重，且持续时间较长，导致线路低

电压频繁；③电压无功调节设备不全面，有载调压变等设备还未装备，普遍为无载配变；④地区现有自动控制系统是对电压和无功进行孤立的调节，没有把电压与无功的调节有机地结合起来，应用功能单一，实用性不强。而且电压无功调节设备都只是单点分布（自动投切），无法实现系统级的无功电压协调控制，动作次数过于频繁，严重影响了供电质量和稳定性；⑤配电网中的通讯因网络信息安全法，禁止无线通讯模式的遥控和遥调，无法实现对下属调节设备的投切控制。

2 无功补偿对台区低电压的有效措施

在交流电力系统当中，电磁感应是电能转换和传输的基石，无论是电能的转换设备还是电能的传输设备均是如此，在电能时刻的传输变换过程当中，时刻伴随着电磁场的不断交替，保持着电能守恒这一基本规定。而在电力系统能量交互时主要依靠电感电容元件，以无功功率的形式体现在电网当中，但是无功增大会使得输电线路电流进一步增加，当电流流过输电线路后会产生大量的无功损耗，从而进一步降低线路电压^[7]。因此，在既不增大线路无功又能满足系统感性元件对无功的消耗的情况下，达到提高台区输电线路电压的目的，但是在实际的配电网线路当中，由于对无功的控制得不到合理化，从而出现控制区域无功供不应求的现象，导致供电负荷从其他地方获取无功，使得无功远距离开始传输，导致供电线路电压开始下降和线路损耗剧增^[8]。

由于配电网线路设置较为复杂及输电距离较长，在电网用电负荷高峰期会出现电压幅值急剧下降，为解决配电网低电压问题，需要进一步对配电网线路模型进行研究，以达到在高峰用电负荷时期，对各区域无功进行有效的调节和控制，进而达到对线路电压的控制。而现有的分区方法如自由分区法、均一网格法等负荷分区法均没有充分考虑分区内无功平衡的约束^[9]，

从而导致电压得不到有效抑制，在本文中先对配电区域进行有效的分区，原则为：由于配网线路各链接节点处电压和无功存在着一定的约束关系，可以将其定义为一个无功电源点，再根据各节点之间的电气距离确定区域的合成，从而确定无功约束条件和电气距离约束函数。本文中的电气距离指的是配网线路中某一节点处的电压变化量对另一节点无功功率变化量的比值 K 。即 $K = \Delta U / \Delta Q$ ，假定配电线路网络当中，某一节点 N 处的有功为 P ，无功为 Q ，其表达式为^[9]：

$$Q_n = U_n \sum_{m \in N} U_m (-B_{nm} \cos \beta_{nm} + G_{nm} \sin \beta_{nm}) \quad (1)$$

$$P_n = U_n \sum_{m \in N} U_m (B_{nm} \sin \beta_{nm} + G_{nm} \cos \beta_{nm})$$

$$n=1, 2, \dots$$

式中， Q_n 为 n 节点输入的无功功率； P_n 为 n 节点输入的有功功率； U_n 为 n 节点处的电压幅值； U_m 为 m 节点处的电压；在节点导纳矩阵中 B_{nm} 为虚部； G_{nm} 为实部； β_{nm} 为节点 n 和 m 之间角差。有功和无功变化量方程为：

$$\Delta Q_n = Q_n - U_n \sum_{m \in N} U_m (-B_{nm} \cos \beta_{nm} + G_{nm} \sin \beta_{nm}) \quad (2)$$

$$\Delta P_n = P_n - U_n \sum_{m \in N} U_m (B_{nm} \sin \beta_{nm} + G_{nm} \cos \beta_{nm})$$

根据亚克比方程式的推导，可以得出配电线路中

的电气距离 H 与配电线路中电压和无功的比值 K 之间的关系可以进一步表示为：

$$H_{nm} = (K_{nm} + K_{mn}) / 2 \quad (3)$$

本文中提出对配网线路进行分区，其目的是使所分的各个区域之间的无功补偿得到有效的分配，各区域之间的距离最小，对配网线路的电压调节能力达到最大，约束表达式可以写成如下方式：

$$\min f(h) = K_{nm} \quad (4)$$

约束条件满足以下几个条件，一是每个区域内部的总无功要大于等于调整电压所消耗的无功；二是对分区中的节点数做出合理的规划，节点数量太多，导致发出的无功总量太多过剩，若节点数量太少，导致无功太少，达不到平衡。图 2 中配网线路的配网算例共 17 个节点，电压等级为 110kV，共有配变变压器 9 台，无功补偿装置 4 台，其接线图如图 2 所示。假定变压器的基准功率为 101kVA，基准电压 10kV，高压侧母线电压为 110kV，发电机至三相绕组变压器节点 1 处为平衡节点，本文中计算所采用的数据均为某一时段，系统自动采集的数据，利用 SCADA 及 Matlab 进行仿真得出，如表 1~ 表 5 所示。为进一步地简化计算及分析，本文中对图中所连的设备逐一进行调节。

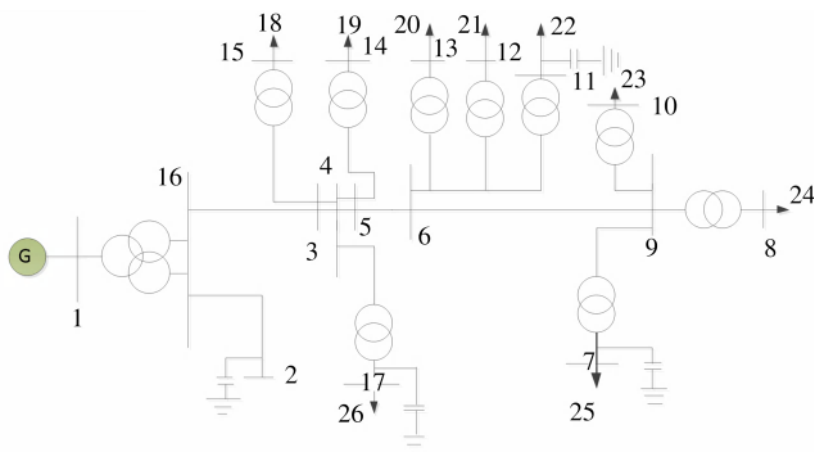


图 2 110kV 节点配网线路图

表 1 无功补偿设备数据 (标么值)

节点号	无功 补偿量	无功 上限	无功 下限	单位 容量
2	2.13	5	0	0.1
17	1.33	5	0	0.1
11	1.37	5	0	0.1
7	1.73	7	0	0.1

表 2 发电机数据

节点类型	节点 号	无 功	有 功	无功 上限	无功 下限	电 压
平衡节点	17	0	0	18	0	1

表 3 10kV 配网线路负荷电气参数

节点 号	有功 功率	无功 功率	节点 号	有功 功率	无功 功率
18	0.782	0.953	22	0.55	0.732
19	0.652	0.854	23	0.461	0.611
20	0.543	0.732	24	0.212	0.687
21	0.41	0.66	25	0.51	0.742

表 4 等效不可调变比双绕组变压器支路数据 (标么值)

支路起 始节点	支路终 止节点	支路 电阻	支路 电抗	电 导	电 纳	变化 比
1	16	0.0081	0.3021	0	0	1
3	15	0.0143	0.3554	0	0	1
4	17	0.0167	0.4421	0	0	1
5	14	0.0154	0.3651	0	0	1
6	12	0.0078	0.2631	0	0	1
6	13	0.0188	0.2554	0	0	1
9	10	0.0076	0.3658	0	0	1
9	24	0.0023	0.1564	0	0	1

表 5 线路参数

支路开 始节点	支路终 止节点	电阻	电抗	电纳
3	18	0.00453	0.0156	0.0023
4	26	0.00671	0.00876	0.0031
5	19	0.00553	0.01763	0.0043
6	20	0.00453	0.01885	0.0067
6	21	0.00563	0.00654	0.0055
6	22	0.00334	0.01431	0.0043
9	23	0.00683	0.00655	0.0067
9	25	0.00731	0.00819	0.0081
9	24	0.00564	0.01782	0.0077

采用无功控制分区方法，得到电压无功控制分区，然后，再逐一进行计算各个分区的目标函数，区域一的目标函数为 $\min f_1(x) = 0.00344$ ，区域二的目标函数为 $\min f_2(x) = 0.00423$ ，区域三的目标函数为 $\min f_3(x) = 0.00471$ 。可以得出区域一为 (3、4、5、13、18、19、14、17、26)，区域二为 (10、13、12、21、22、11、6)，区域三为 (23、10、9、8、24、7、25)。可以得出节点 5 与节点 6 之间的电气距离为 0.0048，节点 6 与节点 9 之间的电气距离为 0.0053，很明显不同区域边界节点的电气距离要大于同一区域内的节点电气距离，可以看出在同一个区域内不同节点之间的电气距离联系比较紧密，因而分区比较合理。

3 结束语

本文中提出的配网输电线路的配电网分区方法以无功电源节点为初始节点，以配网输电线路电气距离为分区依据，以目标函数和约束条件为分区准则，得到了配网输电线路不同输电区域的合理分区，使得所分的各分区满足无功平衡条件与节点电压的调节要求，为配网输电线路建立通过提升无功补偿来进一步遏制配网线路电压降低问题提供了电压整治方法和基础。

参考文献

[1] 何晋伟, 孟维奇, 蒋玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略 [J]. 高电压技术, 2023, 49 (7): 2983-2994.

[2] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (24): 1-12, 21.

[3] 张召召. 基于用电信息采集数据的电能质量评估方法 [D]. 长春: 长春工业大学, 2022.

(下转第 29 页)

(上接第 39 页)

- [4] 曾祥伟. 低电压对电能计量及线损的影响 [J]. 电气技术与经济, 2023 (8) : 334-335, 342.
- [5] 宋桂波. 电能计量采集运维及其故障处理措施 [J]. 电力系统装备, 2023 (2) : 125-127.
- [6] 张芸. 农网用户低电压智力的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [7] 仇世邦. 县域配电网低电压分析与治理[D]. 济南:

山东大学, 2018.

- [8] 王博宇. 农村电网低电压优化研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- [9] 李智宇, 陈建福, 张尧. 基于优化分区的配电网规划研究及实践 [J]. 广西电力, 2006 (4) : 1-4.

(收稿日期: 2024-01-16)