

基于配变档位优化的多级调压策略研究

为解决电压频繁越限而导致配电网电压合格率低的问题。建立了典型配电网结构数学模型，分析了电压越限的主要影响因素，提出优化配电变压器档位的方法，充分发挥无载调压配电变压器的调压能力；在此基础上，对部分特殊线路提出多级调压的策略，充分挖掘变电站、线路和配电变压器间协同调压潜力。工程实例表明，该策略不改变现有电网规划，投资少，能有效治理电压越限，提高配电网电压合格率，经济、社会效益明显。

申玉梅¹ 曹云轩^{1,2} 吴思成¹ 毛昭辉³ 曹诗雅⁴ / 1. 国网重庆长寿供电公司
2. 重庆曹博工作室 3. 河海大学机电工程学院 4. 东北林业大学机电学院



申玉梅/工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
电压越限 ·
档位优化 ·
多级调压 ·

配电网（以下简称为“配网”）具有供电半径长、降压层次多和自动化水平低等特点^[1]。配网电压频繁越限导致电压合格率较低的问题长期存在，严重制约国民经济的发展^[3-5]。无载调压配电变压器（以下简称为“配变”）仍然是现阶段配网中广泛使用的配变，调档需要停电完成^[6]。对平均负荷率较大、电压越限较频繁的配网，采用新建、改造变电站和线路以及更换有载调压配变等方法能很好地解决问题，投入产出比高，经济性好^[7]。但对平均负荷率较低，季节性、临时性或局部性电压越限的配网而言，采用上述方法不仅耗时长，且投入产出比较低，经济性较差。

通过建立典型配网结构数学模型，对电压越限的各种影响参数进行了分析，对调压原则进行了说明，从不投资或少投资的角度出发，提出优化配变档位的方法，充分发挥配变的调压能力；同时，针对部分负荷重、供电半径长或特殊运行方式的线路，提出无须改变现有配网结构，且投资小的多级调压策

略，充分发挥变电站、线路和配变间的协同调压潜力。最后通过工程实例验证了策略的有效性和经济性。

电压越限概述

1. 电压偏差和越限定义

供电电压偏差是电能质量的基本指标之一，反映供电点上电压水平（有效值）偏离系统标称电压的程度，其基本表达式为：电压偏差（%）=（电压测量值 - 系统标称电压）/ 系统标称电压 × 100%。

GB/T 12325—2008^[8]《电能质量 供电电压偏差》中对电压偏差限值的规定如表1所示。电压越限指电压过高或过低，超过了电压偏差限值。

表1 用户受端电压偏差限值

电压等级	电压偏差	偏差下限	偏差上限
10 kV	-7%~7%	9.3 kV	10.7 kV
380 V	-7%~7%	353.4 V	406.6 V
220 V	-10%~7%	198.0 V	235.4 V

2. 电压越限影响因素及调压原则

电压越限是配网中一个较普遍的问题。图1为典型的配网结构图。图1中， U_s 为系统电压； U_0 为变电站母线电压； R_i 、 X_i 为变电站至某配变10 kV线路参数； U_1 、 U_2 和 U_3 分别为某配变入口、出

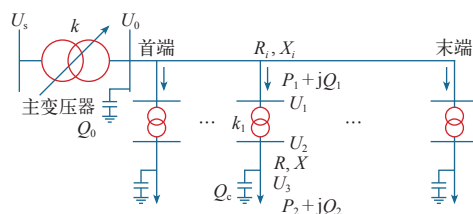


图1 配网结构图

口和用户侧电压； Q_0 、 Q_c 分别为主变低压侧和用户侧无功补偿； R 、 X 为某配变出口至用户间低压线路参数； k 和 k_1 分别为主变压器和配变的电压比。

现以某用户侧电压为例，为简化分析，不考虑变压器损耗问题，且忽略电压降的横向分量，则具有以下数学关系，即

$$U_0 = \frac{1}{k} U_s \quad (1)$$

$$U_1 = U_0 - \frac{P_1 R_i + (Q_1 - Q_0) X_i}{U_1} \quad (2)$$

$$U_2 = \frac{1}{k_1} U_1 \quad (3)$$

$$U_3 = U_2 - \frac{P_2 R + (Q_2 - Q_c) X}{U_3} \quad (4)$$

从式(1)~式(4)可知，用户侧电压 U_3 与主变压器电压比 k 、配变电压比 k_1 、无功补偿 Q_0 、 Q_c 以及线路参数 R_i 、 R 、 X_i 和 X 等因素有关。由于 R_i 、 X_i 值与线路长度成正比，故10 kV线路首端电压降较小，发生电压越上限的可能性较大；线路末端电压降较大，发生电压越下限的可能性较大。治理电压越限的关键是合理调节有载调压主变压器电压比 k ，无功分层、分区补偿，就地平衡（改变 Q_0 、 Q_c ），充分发挥配变调压功能（配变电压比 k_1 ），局部线路加装调压变压器（减小线路参数 R_i 、 X_i ）等，还应强化各调压环节间的联系（合理制定调压策略）。

由于线路无功影响线路电压降，在进行有载调压时，应先保证线路无功充足；上、下级无功分布互相影响，为实现就地平衡，无功应自下而上分层补偿；电压等级越高对线路的稳定性影响越大，调压应优先保证10 kV电压合格。

电压越限解决策略

调压的目的是保证用户电压质量合格，即将电压偏差最大限度地控制在合格范围内。主要方法是优化配变档位，更严格控制配变出口电压范围，并结合实际情况，制定不同线路的多级调压策略。

1. 配变档位优化策略

根据GB 12325—2008的规定，标称电压为

380 V，低压线路首端带三相负荷时，假设线路不存在电压降，即低压线路电压等于配变出口电压，电压上限为 $380 \text{ V} \times (1 + 7\%) = 406.6 \text{ V}$ ；低压线路首端带相负荷时，标称电压为220 V，电压上限为 $220 \text{ V} \times (1 + 7\%) = 235.4 \text{ V}$ ，即三相电压为 $235.4 \text{ V} \times 1.732 = 407.7 \text{ V}$ 。综合考虑，配变出口电压上限设定为406.6 V。低压线路末端带三相负荷时，电压下限为 $380 \text{ V} \times (1 - 7\%) = 353.4 \text{ V}$ ；考虑线路末端电压降，配变出口电压下限设定为380 V，即允许低压线路最大电压降为7%。

综上所述，配变出口电压范围为380~406.6 V，低压线路负荷变动较大时，轻载时，线路首端负荷电压运行在上限，而末端负荷运行在线路的额定电压附近；重载时，首端负荷运行在额定电压附近，末端负荷运行在下限附近。满足配变出口电压偏差限值的配变一次侧电压与配变档位的关系如表2所示，可依据潮流计算确定的线路节点电压变动范围，选择相应配变档位。

表2 配变档位选择

配变 档位	档位范围 (%)	电压比 k 值	10 kV电压 下限/kV	10 kV电压 上限/kV
I	5	26.25	10.00	10.65
II	2.5	25.625	9.75	10.40
III	0	25	9.50	10.15
IV	-2.5	24.375	9.30	9.90
V	-5	23.75	9.30	9.65

由上述方法确定的配变档位选择重叠时，靠近变电站（10 kV线路首端）的配变尽量选择低的档位，远离变电站（10 kV线路末端）的配变尽量选择高的档位，如表3所示（表3中空白数据表示电压越上限或越下限）。

2. 多级调压策略

多级调压是指变电站主变压器有载调压、线路调压（调压变）和配变档位优化等协调进行的调压措施，并配合进行无功就地补偿^[9-10]。根据电压越限的严重情况，可分为常规的二级调压和特殊的三级调压两种。前者是指主变压器有载调压—配变调压，并配合进行无功就地补偿。后者是在前者的基础上，在部分10 kV线路中后段安装

表3 配变档位优化选择

10 kV线路电压/kV	配变出口电压/V (首端)					配变出口电压降7%电压/V (末端)				
	I 档	II 档	III 档	IV 档	V 档	I 档	II 档	III 档	IV 档	V 档
9.30				381.5	391.6				354.8	364.2
9.50			380.0	389.7	400.0			353.4	362.5	372.0
9.65			386.0	395.9	406.3			359.0	368.2	377.9
9.75			390.0	400.0				362.7	372.0	
9.90		380.5	396.0	406.2			353.9	368.3	377.8	
10.00	381.0	390.2	400.0			354.3	362.9	372.0		
10.15	386.7	396.1	406.0			359.6	368.4	377.6		
10.40	396.2	405.9				368.5	377.5			
10.65	405.7					377.3				

有载调压变压器和无功补偿装置,改善线路电压质量。多级调压原理和策略分别如图2、图3所示。

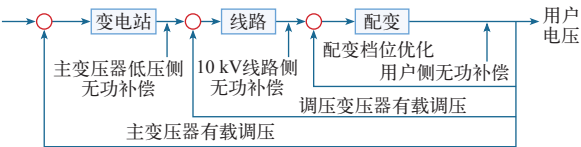


图2 多级调压原理

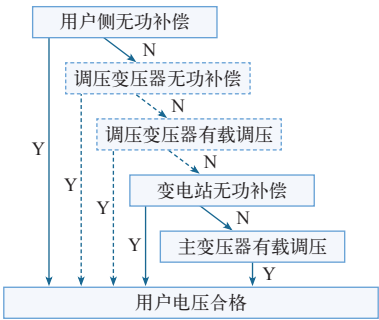


图3 多级调压策略

线路所带负荷较重时,当10 kV线路压降较大导致配变出口电压较低时,按以下顺序进行二级调压,当其中任一步骤调压后,用户电压已合格,则停止下一步操作。

- 1) 当用户侧有无功补偿裕度时,对用户侧进行无功补偿。
- 2) 当变电站有无功补偿裕度时,对主变低压侧集中进行无功补偿。
- 3) 当线路无功充足,主变压器有调压裕度时,进行主变压器有载调压。

线路供电半径长、所带负荷重或在特殊运行方式下,当10 kV线路电压降较大导致配变出口电

压较低时,按以下顺序进行三级调压,当其中任一步骤调压后,用户电压已合格,则停止下一步操作。

- 1) 当用户侧有无功补偿裕度时,对用户侧进行无功补偿。
- 2) 当调压变有无功补偿裕度时,对调压变压器进行无功补偿。
- 3) 当线路无功充足,调压变压器有调压裕度时,调压变压器自动进行有载调压。
- 4) 当变电站有无功补偿裕度时,对主变压器低压侧集中进行无功补偿。
- 5) 当线路无功充足,主变压器有调压裕度时,进行主变压器有载调压。

3. 各策略适用条件

配变档位优化策略是解决电压越限的基本措施之一,既可解决负荷较轻时,首端“高压”问题,也可解决线路长、负荷重时,末端“低压”问题。由于现阶段我国配网自动化程度较低,多数配变仍是无载调压的,调整配变档位需要停电操作。因此,配变档位优化的关键是建立完善的用户电压越限台帐,并在历史数据的基础上,合理预测线路负荷,根据线路负荷,进行配网潮流计算,确定10 kV线路不同节点的电压波动范围。

多级调压策略主要解决线路长、负荷重等导致的中、末端“低压”问题。同时,对一些特殊运行方式导致的“低压”问题,也有较好的提升作用。调压的关键是主变压器、线路和用户侧有

充足的无功补偿裕度，且线路和用户侧电压可实时监控。

各调压策略适用条件如表4所示。实际运行中，由于电压越限往往是“高压”与“低压”同时存在，需要进行配变档位优化和多级调压间协调配合才能取得更好的效果。

表4 各调压策略适用条件

调压策略	电压越限原因	适用范围	调压关键
配变档位优化	配变档位未适时调整	解决首端“高压”问题	建立完善的用户电压越限台帐
	未充分发挥调压作用	解决局部线路“低压”问题	预测线路负荷，进行潮流计算
二级调压	负荷波动较大，线路较长，负荷较重	主要解决末端“低压”问题	要求用户侧电压可实时监控
	主、配变间缺乏协同调压策略		主变压器、用户侧无功补偿裕度充足
三级调压	负荷波动大，线路长，负荷重	主要解决末端“低压”问题	二级调压的基础上，增加线路调压变压器
	特殊运行方式下		要求线路、用户侧电压可实时监控
	主变压器、配变和线路间缺乏协同调压策略		主变压器、线路和用户无功补偿裕度充足

实例分析

某地线路负荷性质主要为专用变压器供电的大电动机负荷，负荷随季节波动明显，低压配网线路电压降在5%内，部分线路首端常出现“高压”现象，而末端“低压”现象较为严重，线路结构如图4所示。线路1首、中和末端均有负荷，重负载12 000 kV·A，轻负载6 500 kV·A，首端（0.3 km）共有配变9台，运行档位Ⅲ档，配变出口电压为410.4~412.8 V，电压高且越上限。线路2负荷分布不均，主要集中在线路末端，线路功率因数为0.9左右，其中，线路2-1（13.3 km）共有配变23台，运行档位Ⅴ档，线路重负载5 000 kV·A，轻负载3 000 kV·A，配变出口电压为349.9~386.1 V，电压低且越下限；线路2-2（5.6 km）共有配变12台，运行档位Ⅱ档，重负载3 000 kV·A，轻负载1 500 kV·A，配变出口电压为372.3~387.5 V，电压较低。

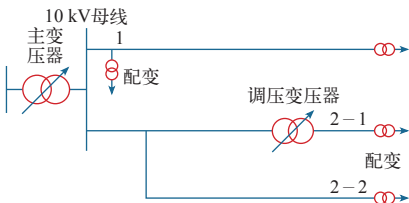


图4 某地线路结构

1. 实施方案

1) 线路1首端电压波动范围为10.26~10.32 kV，

电压降范围为0.77%~1.35%，考虑采取优化配变档位方式，即将首端9台配变档位由Ⅲ档调为Ⅱ档。

2) 线路2-1电压波动范围为8.31~9.17 kV，电压降范围为11.83%~20.10%，电压降较大且配变运行在最高档，考虑在线路末端加装一台SVR-5000/10-7（0%~20%）馈线自动调压变压器，调压上限设置为10 kV，同时将末端23台配变档位由Ⅴ档调为Ⅲ档。

3) 线路2-2电压波动范围为9.54~9.93 kV，电压降范围为4.52%~8.27%，考虑采取优化配变档位方式，即将末端12台配变档位由Ⅱ档调为Ⅲ档。

2. 应用效果

采用上述措施后，3条线路电压对比情况如表5所示。3条线路配变出口电压范围分别为400.4~402.7 V、392.4~399.2 V和381.6~397.2 V。与实施前相比，电压质量明显改善，用户电压合格率由95.2%提高至98.6%。

3. 经济、社会效益分析

1) 方案实施后，该区域年供电量约为14 000 MW·h，综合线损由9.2%下降至7.3%，年总体节能266 MW·h，按0.5元/（kW·h）计算，年节约电费13.3万元，可在较短期内收回线路调压变成本。

2) 方案实施前，该地区原本将规划新建110 kV变电站一座，方案实施后，短期内该区域无规划建设必要。

表5 数据对比

线路	配变容量/kV·A	原电压/kV	最大电压降(%)	现电压/kV	原配变档位	现配变档位	原出口电压/V	现出口电压/V	备注
1	12 000	10.26	1.35	10.26	Ⅲ	Ⅱ	410.4	400.4	首端高压
1	6 500	10.32	0.77	10.32	Ⅲ	Ⅱ	412.8	402.7	
2-1	3 000	9.17	11.83	9.98	V	Ⅲ	386.1	399.2	末端低压
2-2	1 500	9.93	4.52	9.93	Ⅱ	Ⅲ	387.5	397.2	
2-1	4 000	8.75	15.87	9.96	V	Ⅲ	368.4	398.4	
2-2	2 000	9.76	6.15	9.76	Ⅱ	Ⅲ	380.9	390.4	
2-1	5 000	8.31	20.10	9.81	V	Ⅲ	349.9	392.4	
2-2	3 000	9.54	8.27	9.54	Ⅱ	Ⅲ	372.3	381.6	

3) 方案实施后, 用户受端电压质量明显提高, 有效延长电动机等设备的使用寿命, 用户电压投诉率明显降低。

结束语

配网电压频繁越限是导致电压合格率较低的重要原因, 新建、改造变电站、线路, 更换有载调压配变等方法效果好, 但投入产出比低, 对平均负荷率较低, 季节性、临时性或局部性电压越限的情况而言经济性较差。提出优化配变档位的方法, 充分发挥无载调压配变压器的调压能力; 在此基础上, 对部分特殊线路提出多级调压的策略, 充分挖掘变电站、线路和配变间协同调压潜力。工程实例表明, 该策略不改变现有电网规划, 投资少, 能有效治理电压越限, 提高配网电压合格率, 经济、社会效益明显。

参考文献

[1] 赵海. 配电网电压稳定性及控制方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.

[2] 诸葛斌. 配网结构对电压质量的影响及无功补偿

对策 [J]. 电力电容器, 2007, 28 (5): 1-4.

[3] 谢广健. 佛山电网电压调控对电压质量和电压稳定性影响评估 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[4] 王振, 方方. 变电站电压调节的几种方式 [J]. 电工技术, 2008 (8): 73-74.

[5] 严浩军. 变电站电压无功控制装置实用技术研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

[6] 詹涛, 徐春民, 高飞. 基于线路电压降理论计算优化配变分接头管理 [J]. 农村电气化, 2012 (6): 5-7.

[7] 刘家军, 刘栋, 姚李孝, 等. 农网低电压治理的三级联调方式研究 [J]. 西安理工大学学报, 2011, 27 (4): 423-429.

[8] GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[9] 李瑞桂. 农网低电压综合治理 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[10] 路宁. 配电网电压无功三级联调控制研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.

(收稿日期: 2015-03-17) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告