

# Research on Low Voltage Control of Huanghua Grid

Zhigang Xin<sup>\*</sup>, Yanqi Yin, Xiaoyan Liang

Huanghua Supply Company, Qinghai Power Company, State Grid, Jiansha 811200, China

\*Email: xinzg@sina.com

## Abstract

Focusing on the distribution grids weak supply capabilities and low voltage phenomenon during peak loads in Agricultural pastoral areas of Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture in Qinghai province, based on Newton Ralph method, this paper finds out the low voltage areas and proposes corresponding improving approaches through flow current analysis on high and low power grids. The simulation results show that the control schemes are economical and effective.

**Keywords:** Huanghua Power grid, Flow Computation; Low voltage; Handel

## 黄化电网低电压治理研究

辛志刚，尹延麒，梁晓艳

国网青海省电力公司黄化供电公司，青海 尖扎 811200

**摘要：**针对青海省黄南藏族自治州农区牧区配电网供电能力薄弱、负荷高峰期低电压问题突出的现象，基于牛顿拉夫逊法，对黄化电网的高压电网和低压电网进行潮流分析，找出了低电压产生的区域和原因，并提出了相应的治理措施。仿真结果表明，本文所提出的治理方案是经济和有效的。

**关键词：**黄化电网；潮流计算；低电压；治理

## 引言

黄南藏族自治州位于青海省东南部，辖同仁县、尖扎县、泽库县、河南蒙古族自治县，有 28 个乡和 7 个镇，面积 1.88 万平方公里，人口 21.25 万人，有藏、蒙古、汉、回、土、撒拉、保安等 15 个民族，其中少数民族占总人口的 92.19%。黄化供电公司位于青海省东南部，电网覆盖黄南藏族自治州同仁、尖扎、河南、泽库四县和海东地区循化、化隆两县，供电面积 2.24 万平方公里，供电客户 12.67 万户。公司运行维护着 330 千伏变电站 1 座、110 千伏变电站 8 座、35 千伏变电站 19 座，变电总容量 94.11 万千伏安；35-110 千伏线路 57 条 1448.88 公里，330 千伏线路 7 条 465.085 公里。黄化电网区域内水电资源丰富，接有苏只、直岗拉卡等大型水电站，负荷低谷时通过平衡节点向外送电。此外，黄化电网还装有小型分布式光伏电站，但就装机规模而言，属低渗透率电网<sup>[1]</sup>。黄化电网的典型特征是网内负荷偏低，其最大负荷率不到额定容量的 30%，属轻载电网，加上这几年国家淘汰落后产能，境内某些高耗能、污染企业相继关停，轻载问题就更加突出。由于这个原因，即使某些 10kV 及 0.4kV 线路供电半径超过了规定距离，也未曾出现过低电压现象。但是，随着地区社会、经济和文化的发展，受“家电下乡”政策的鼓舞，家用电器猛增，农村养殖业迅速发展，线路向非电地区延伸、以及非电地区居民向通电地区聚集迁移，使得部分用户在用电高峰期间电压偏低，不能满足正常的用电需求，特别是少数民族用户过斋月等节日时用电量成倍增加导致投诉率增加<sup>[2]</sup>。国内对于农村配电网低电压规律的分析研究，可谓成绩斐然，如江苏、湖北、广东等省市通过对农村低电压产生的原因分析，分别提出了有针对性的治理措施，有效地提高了配电网电压质量，降低了电压

投诉率<sup>[3]</sup>。国家电网公司也给出了县级农村电网治理导则，指导各地区、各部门的农网治理标准<sup>[4]</sup>。然而，黄化电网不同于东部经济发达地区人口稠密的农村电网，具体治理时，在有关国家县一级农网治理标准的指导下，须结合自身的特点，找出低电压产生的原因和区域，提出有针对性的治理措施，做到对症下药，事半功倍的效果。基于此，本文采用黄化供电公司提供的线路资料和负荷特征，基于牛顿-拉夫逊(N-R)对黄化电网的高低压电网分别进行潮流分析，找出了低电压产生的原因和区域，并提出了相应的治理措施，有效地改进了黄化电网运行质量。

## 1 牛顿-拉夫逊法潮流计算基础

N-R 法是电力系统潮流分析中常用的一种计算方法，具有精度高、收敛速度快等优点，在电力系统稳态分析、状态估计等方面得到了广泛的应用。其修正方程如下[5]：

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

上式中， $P_i$  和  $Q_i$  是节点  $i$  注入到网络中的有功和无功功率， $U_i$  和  $U_j$  是节点  $i$  和  $j$  的电压幅值， $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  是节点  $i$  和  $j$  的电压相位差， $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间的支路导纳， $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  是经节点  $i$  注入到网络的不平衡功率。对于一个具有  $n$  个节点的网络，设有 1 个平衡节点， $m-1$  个 PQ 节点， $n-m-1$  个 PV 节点，则不平衡方程总数为  $n-m-2$  个。

将式(1)(2) 不平衡方程按泰勒级数展开，并略去二次及高次项后，即可得修正方程

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式中  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  是由  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  组成的不平衡列向量， $\Delta \delta$  和  $\Delta U/U$  是修正向量，而  $H, N, J, L$  为系数矩阵，即雅可比矩阵各元素[5]。

N-R 法是潮流计算的步骤为：(1) 根据原始资料形成节点导纳阵；(2) 设定各节点电压初值  $U_i^{(0)}$ ， $\delta_i^{(0)}$ ；(3) 将节点初值代入(1)(2)式，求出修正方程式的常数项向量  $\Delta P_i^{(0)}$  和  $\Delta Q_i^{(0)}$ ；(4) 将节点电压初值代入系数矩阵（雅可比矩阵），求出雅可比矩阵各元素；(5) 求解修正方程，求修正向量  $\Delta U_i^{(0)}$ ， $\Delta \delta_i^{(0)}$ ；(6) 求取节点电压的新值，即  $U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$ ， $\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}$ ；(7) 将  $U_i^{(1)}$ ， $\delta_i^{(1)}$  代入(1)(2)式求出  $\Delta P_i^{(1)}$  和  $\Delta Q_i^{(1)}$ ；(8) 检查是否收敛，其收敛条件为  $|\Delta P^{(K)}, \Delta Q^{(K)}| < \varepsilon$ ，其中  $|\Delta P^{(K)}, \Delta Q^{(K)}|$  为  $\Delta P^{(K)}, \Delta Q^{(K)}$  向量中最大分量的绝对值，而  $K$  为迭代次数， $\varepsilon$  为事先给定的精度；(9) 如不收敛，则以各节点电压的新值作为初值自第 3 步重新开始进行狭义次迭代，否则转入下一步；(10) 计算支路功率及平衡节点注入功率。

## 2 黄化电网潮流计算

黄化电网潮流计算的目的是判断和识别低电压存在的区域，继而提出有针对性的治理措施并付诸实践。然而，由于黄化电网供电范围较大，包括六个县的城网和农网，节点电压等级有 330kV、110 kV、35kV 及 10 kV 等，另有大量水电站和光伏发电单元。若整体建模，则由于节点数量过于庞大而导致问题求解复杂，单化隆县境内就有 2000 多个 10 kV 以上的节点。因此本文根据黄化电网拓扑结构特点，结合运营特征，首先将黄化电网分为 35kV 及以上高压电网及 35 及以下低压电网两个区域分别进行潮流分析，旨在找出产生低电压的原因究竟是高压电网还是低压电网的原因。显然，这样做有利于降低问题求解规模，逐步缩小求解空间而不影响结果分析的准确性。

2.1 高压电网潮流分析

黄化电网通过 330kV 吉祥变与青海主网连接并进行功率交换，可视为平衡节点，其高压部分有 11 个 110kV 变电站，分别是李家峡变、群科变、加合变、公伯峡变、团结变、丹霞变、保安变、吾屯变、隆务变、夏德日变、优干宁变和尕布变；25 个 35kV 的变电站，分散在 6 个县城，供给相应的 10kV 线路。此外，高压侧的接有 20 个水电站，分别为 6 个 110kV 水电站和 14 个 35kV 级水电站；另有 4 个光伏电站，含 1 个 110kV 级的光伏电站和 3 个 35kV 级的光伏电站。主要的大型水电站有李家峡、公伯峡、苏只和直岗拉卡等电站，李家峡、公伯峡等电能直接通过 330kV 输往西宁等地而不经吉祥变，苏只和直岗拉卡等大型水电站则通过黄化电网的吉祥变与外网连接。35kV 及其以上高压部分网络为多环结构，正常情况下依据开关的设置开环运行。35kV 及其以上高压网络的拓扑结构如图 1 所示。

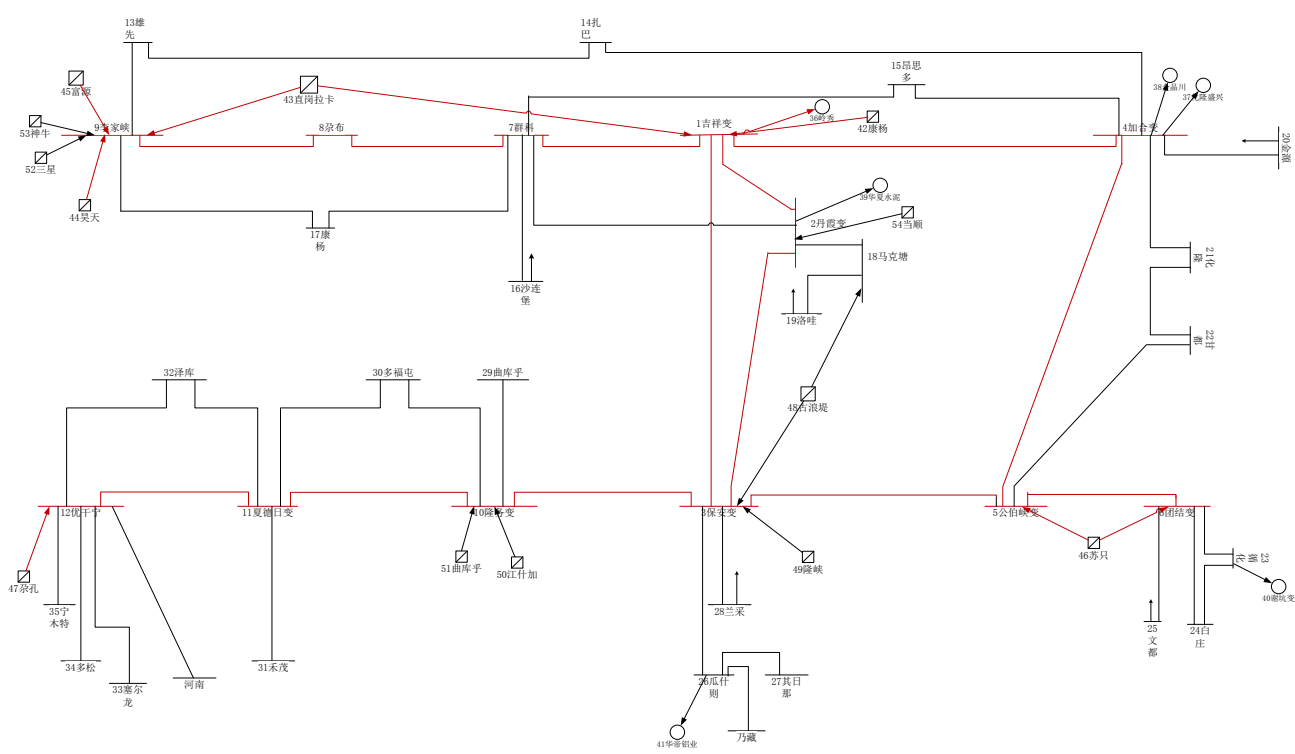


图 1 黄化电网 35kV 及其以上高压网络的拓扑结构示意图

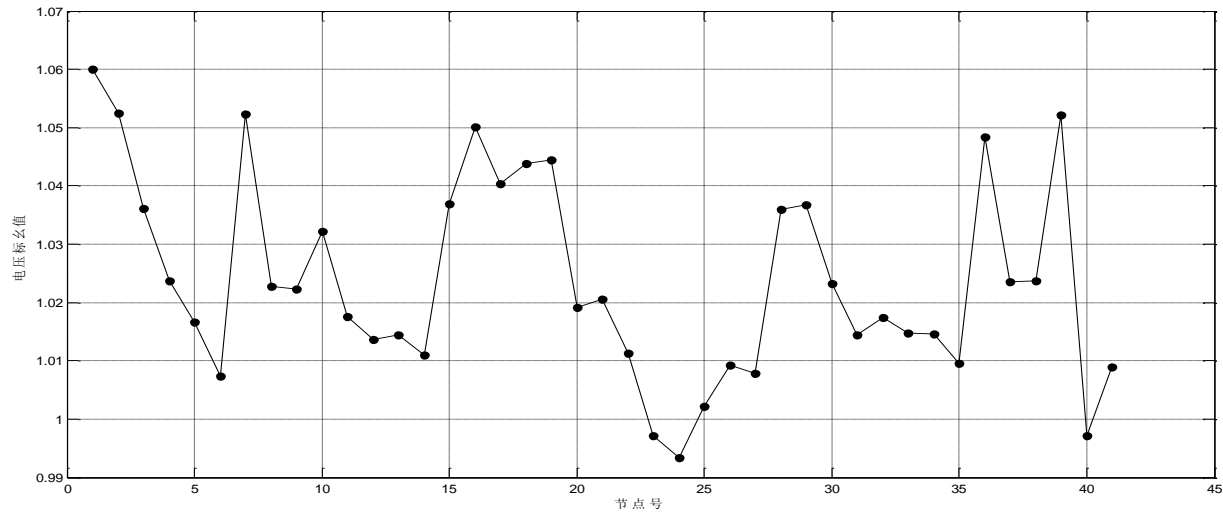


图 2 典型日最大负荷且不考虑水电出力时各节点电压分布曲线

根据黄化供电公司提供的线路基础资料和实测负荷数据，可以对图 1 中的电网进行潮流计算。实际计算

时将 330kV 吉祥变视为平衡节点，水电节点视为 PV 节点，光伏节点简单的处理为 PQ 节点，其它节点视为 PQ 节点，线路阻抗及节点功率均归算至 330kV 侧，选取基准电压为 330kV，基准容量为 1000MVA，则不同运行方式下的潮流计算情况如下：

(1) 系统内各个节点的负荷均按典型日最大负荷来考虑。首先假设高压电网不含当地水电和光伏电站出力，采用牛顿—拉夫逊法进行潮流计算，得各节点电压分布曲线如图 2 所示。根据我国电压标准《供电电压允许偏差》（GB12325-2008）规定：35 及以上电压等级供电电压允许偏差的正负绝对值之差不超过 10%。由图 2 可知，此时各节点电压分布在合理范围内，线路无过载现象。这表明相对于电网供电能力来说，当地负荷规模偏小，即使是峰值负荷，对该电网来说是轻载。再者，仿真结果还显示了吉祥变作为电源点为系统提供功率。同时可以看出，节点电压较低的变电站主要分布在化隆、循化等海东人口较稠密、经济相对发达的县境内。

(2) 系统内各个节点的负荷均按典型日最大负荷来考虑，高压电网含当地水电和光伏电站出力，采用牛顿—拉夫逊法进行潮流计算，得各节点电压分布曲线如图 3 所示。

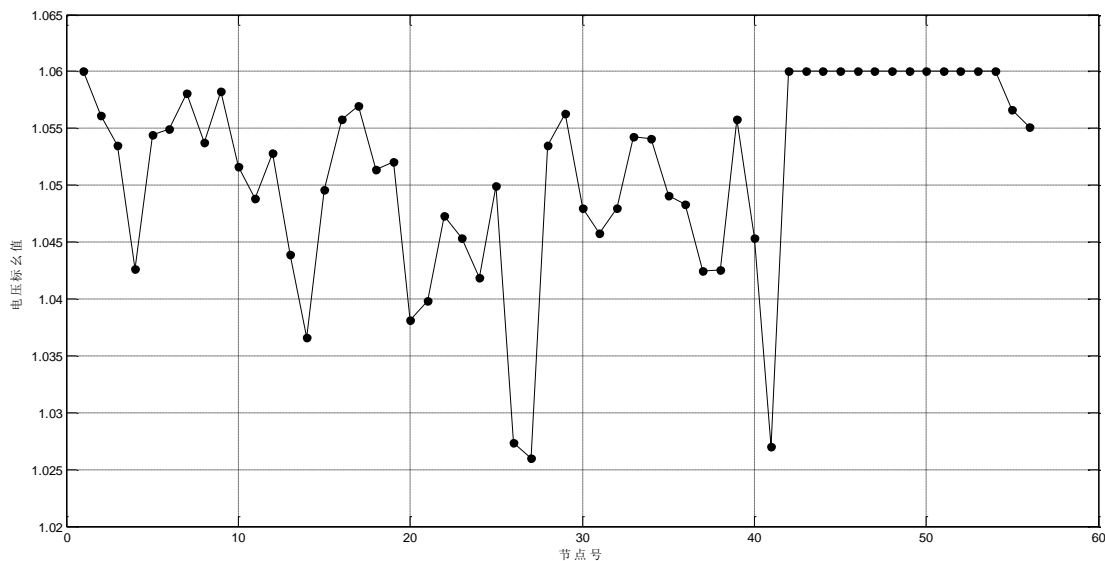


图 3 典型日最大负荷考虑水电出力时各节点电压分布曲线

由图 3 可以看出，此时各节点电压仍在合理范围内，且未出现偏高情况。但和图 2 相比，各节点电压均得到一定的提升。其中，吉祥变作为平衡节点接受系统倒送的功率。

此外，在负荷最小时，分别对上述两种情形下仿真，结果显示了各节点电压得到一定程度的提升，但均在标准规定的范围内，线路无过载现象。当然，在大多数情况下，黄化电网处于负荷严重不足状态，结果导致了高压电网电压偏高的现象。再者，流域内水力发电稳定，不受季节影响，即便在负荷高峰期间，区域内负荷也远不能消耗水力发电容量，导致多余电量外送。

## 2.2 10kV 中压电网潮流分析

黄化电网 10kV 中压网络主要由 35/10kV 变电站生成，个别由 110/10kV 变电站二次侧产生，约有一百四十条这样的 10kV 线路。由于规模较大，仿真时须选取典型的 10kV 线路进行分析，再将研究结果普及到一般线路即可。这里以马三路为例，进行潮流建模及仿真分析。马三路由马克塘变电站的二次侧引出，主要供给马克塘镇附近的居民用电，是比较典型的低电压线路。马三路线路全长 3.71km，供给 29 个台区，包括 9 台公变和 20 台专变，线路未加设无功补偿容量，线路型号为：JKLGYJ-120/70，主干线截面为 120mm<sup>2</sup>。马三路负荷分布地理位置如图 4 所示。

根据调研所得线路资料和负荷数据，采用 Simulink 搭建该 10kV 线路仿真模型。由于线路较长，模块较

多，实际建模时采用了模块封装技术。马三路仿真模型如图 5 所示。

以线路最右端第一个仿真模块为例，介绍封装模块局部接线图。该模块包含 2#供热站、发展改革局、发展改革局(二期供暖)，如图 6 所示。

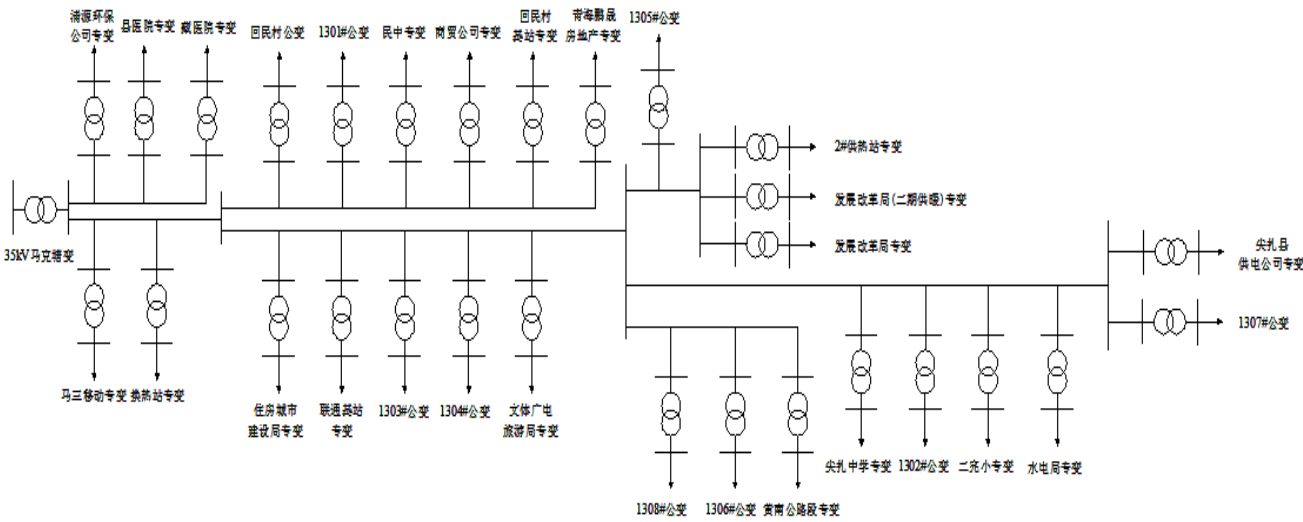


图 4 马三路负荷分布示意图

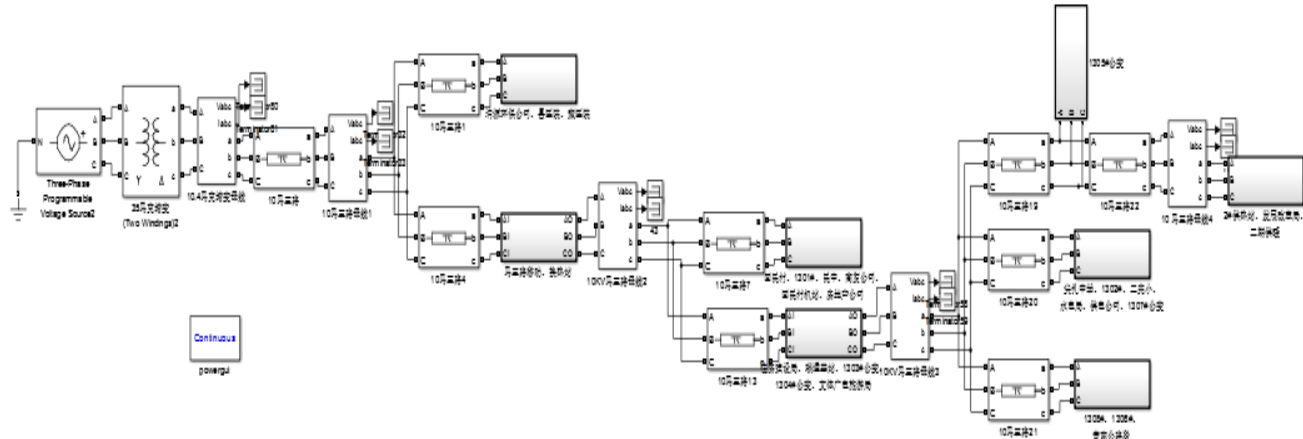


图 5 马三路仿真模型

仿真时马三路负荷采用最大负荷、中等负荷、轻负荷三种负荷情况下的数据进行仿真，目的是能够较准确的了解该线路在不同负荷下电压波动特征。图 7 显示了该线路在最大、中等和轻负荷时的仿真结果。

图 7 中最上层电压变化曲线为轻负荷情况，电压明显较高；中层电压变化曲线为中等负荷情况，电压居中；下层电压变化曲线为最大负荷情况，电压明显低于轻、中等负荷。三条曲线变化趋势基本一致，随着负荷大小与线路长短，显示不同的电压值。但从上述电压变化范围可看出，马三路在三种负荷情况下，电压变化范围为：10.33~9.95kV，10kV 线路上电压波动符合要求。之所以会出现这种情况，原因是线路各台区即使在最大负荷下，相对于线路及变台容量来说，也是轻载线路，即各个变台的实际最大负荷也不到其容量的 20%。对其它几条典型 10kV 线路的仿真结果，也显示了同样的结果。因此，我们可以断定，黄化电网的 10kV 线路处于轻载运行情况，不存在因线路原因引起的低电压问题。

因此，从高压电网和低压电网的潮流分析结果来看，目前还不存在因中高压网络配置不合理等原因引起的低电压现象。相反，由于网络内水电颇丰，加之负荷较轻，中高压网络节点电压较高。从长远看，倘若负荷持续增加则可能使得这些网络节点的电压维持一个较低水平，但由于国家淘汰落后产能、随着高耗能产业的相继停产，短期内这种局面难以改善。

尽管黄化电网的中高压网络具有较高的电压水平，然而，高峰负荷期间低电压用户的投诉率却在增加，这不能不说是一个矛盾。既然低电压现象客观确实存在着，我们有理由断定这是由于 0.4kV 低压用户配电线路不合理引起的，即低电压区域是哪些投诉率比较高的 10kV 线路台区低压侧线路。

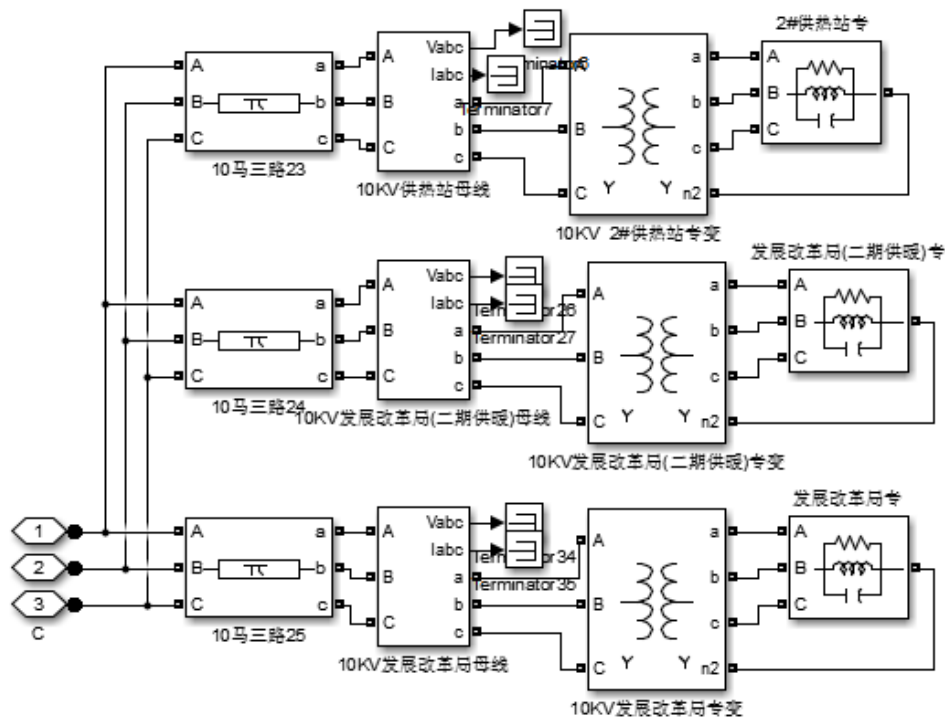


图 6 封装模块模型

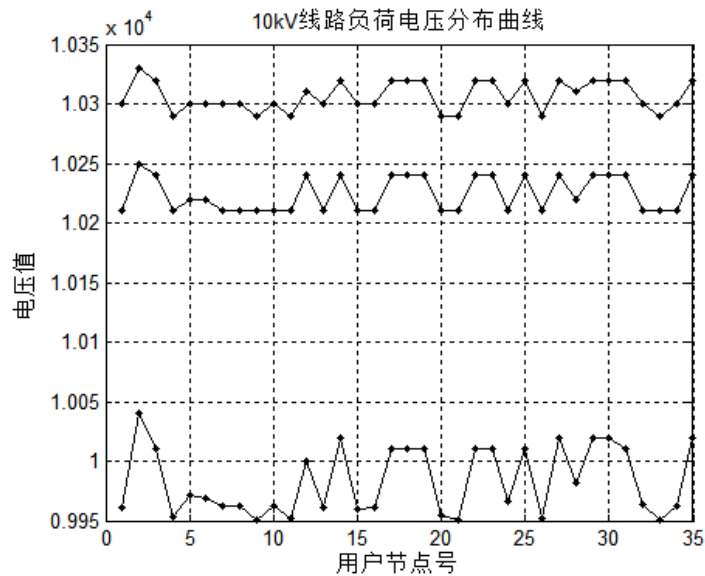


图 7 三种负荷情况的节点电压变化曲线

2.3 0.4kV 低压网络潮流分析

从前面的分析可知，0.4kV 低压用户配电网是造成用户低电压的主要原因。调研得知，各个 10kV 线路台区配变均为 S9，S11 型变压器，符合国家节能环保要求，因此不存在因配变配制不合理引起的低电压问题。这样低电压产生的原因极有可能是高峰负荷时导致的 0.4kV 线路电压损耗增大引起的。由于各台区 0.4kV 配电线路数量庞大，且用户分布及用户负荷情况不很清楚，全部建模进行分析显得困难，也没有必要。但是根据已经得到的线路和负荷信息，可对其进行随机模拟。下面我们以典型线路上的典型台区为

例，来模拟说明线路产生低电压的原因。

据调研得知，马三路的常出现低电压现象。由图 7 最大负荷分布下的电压仿真曲线，初步选择电压较低点 1308#公变进行分析。马三路 1308#公变的概况为：总用户数为 235 户，线路总长 2.1km，0.4kV 最长供电距离为 0.84km，主干线与支线截面均为 50mm<sup>2</sup>。根据线路总长和 0.4kV 最长供电距离，低压出线可分为三条线路，每条线路距离分布和负荷大小均采用均匀分布，每条线路抽样值不超过 0.4kV 最长供电距离；将 235 户采用均匀分布划分为 35 个小集中负荷，每条线路小集中负荷的数量依次为：13，12 和 10。负荷较大者表示用户数目较多，负荷较小表示用户数目较少。低电压情况一般出现在用户过斋月过节等时段，所以仿真模型中各节点负荷均设置为最大值。采用三条出线，并进行均匀分布抽样，主要是为了使仿真模型比较贴近实际用户的分布情况。将模拟数据带到图 5 马三路仿真模型的 1308#公变模块中，不进行任何调压措施，进行仿真计算，各节点电压变化曲线如图 8 所示。

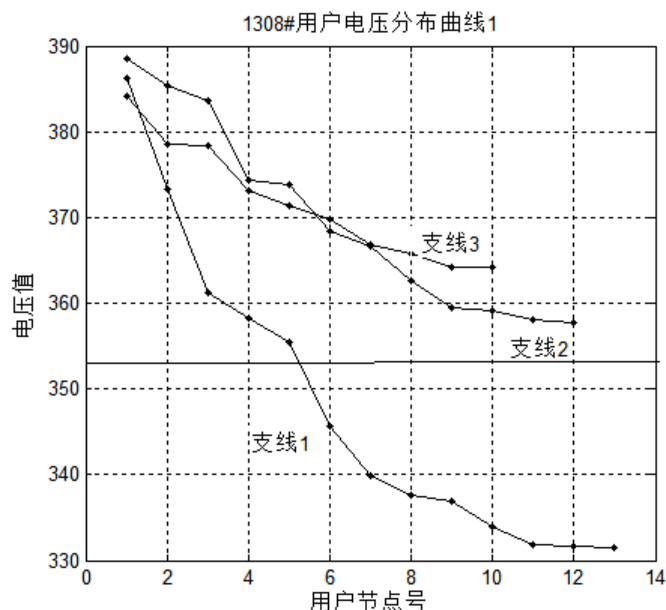


图 8 马三路 1308#公变配电线路电压变化曲线图

图 8 显示了 3 条支线上各用户节点的电压分布情况，每条分支呈现相同的规律：随着各负荷距离 10kV 主变的距离变化，曲线走向从左到右逐渐降低，即 1308#公变所供负荷电压降低幅度逐渐增大；而且负荷分配越大，电压降低越明显，越靠近末端，负荷电压越低。1308#公变所供线路中，负荷分布较多的支线 1 线路中后端负荷低于规定电压下限，出现低电压情况；支线 2 与支线 3 线路末端部分负荷电压也较低，距离主变越远，电压降落越明显。据国家电网公司电力系统电压质量和无功功率的规定，0.4kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ，基于额定三相电压 380V，即变化极限为：406.6V~353.4V。从上述电压变化曲线可看出，0.4kV 侧负荷节点电压波动符合上限要求，有个别负荷低于下限，出现低电压情况。经程序计算统计，大约有 58.8648 个用户出现低压情况，这个结果与实际调研究结果 59 极为相符。主要原因是位于线路末端，损耗较大。

对其它各个出现低电压现象的台区进行了类似仿真，结果也显示了同样的情况，表明对配电网的随机模拟和统计结果是可行的和有效地，基本上能反映实际情况。

### 3 低电压治理措施

根据国家电网县一级农网改造措施和国内等省市的改造经验[6]，我们总结了 11 种农网低电压治理措施，即调节台区配变分接头、台区配变二次侧增加并联电容器补偿、0.4kV 配电线路安装调压器、增加配电线路导线截面、增加 0.4kV 配电线路出线回路、台区配变增容、台区配变改线路调压器、增加变电站 10kV



线路出线回路、35kV 变电站-10kV 线路并补-台区配变三级联调、10/0.4kV 台区配变改 35/0.4kV 变台等 11 种传统调压措施。上述 11 种调压措施有各自的适用范围，不能说哪一种是最好的，具体选择时须针对具体情况具体分析，在经济、技术和环境等方面充分权衡后，方可确定采用哪一种调压措施。

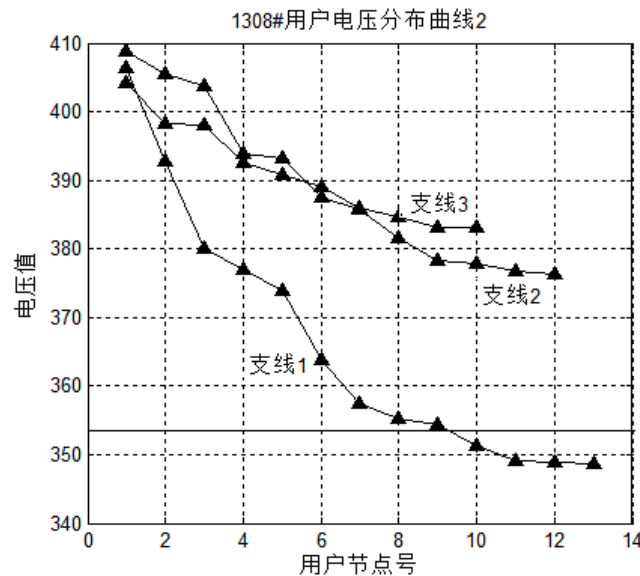


图 9 马三路 1308#公变调分接头后节点电压变化曲线

在上述 11 种调压措施中，增加 0.4kV 配电线路回路数和增加变电站 10kV 线路出线回路须架设新的空中配电线路，这需要增加额外投资和占用空中走廊，影响环境，且牧民坚决反对；台区配变增容、台区配变改线路调压器、10/0.4kV 台区配变改 35/0.4kV 变台等均需要更换设备，在既有配变容量只有 20%的负载率情况下没有必要再增加容量；35kV 变电站-10kV 线路并补-台区配变三级联调技术适合于线路负荷变化大且线路各台区负荷特征变化一致的场合，在仅有 20%不到的负载率情况下，三级联调技术调压作用不明显；增加导线截面也需要更换线路设备增加工程投资，在线路轻载的情形下没有必要采用此种方法。在配电线路轻载的情况下，较为经济而合理的调压措施就只剩下前三种了。调节台区配变分接头技术上简单可行，不增加投资，但应注意该方法的局限性。单独采用调节台区配变分接头使用于地区无功充足，且用户距离配变较近的场合，当地区无功不足时，应结合并联电容器补偿调压。线路调压器是一种根据线路电压的变化，自动调节自身变比使输出电压在合理的范围内的装置，原理相当于自耦变压器调压，常常适用于电压波动比较大的线路。针对黄化电网的实际情况，在考虑技术经济因素后，我们选择此三种方法对典型台区进行低电压治理。根据 2.3 节马三路 1308#公变的潮流分析情况，我们选择马三路 1308#公变的第 3 条支路进行低电压治理。

#### (1) 改变 1308#公变的一次侧分接头

马三路 1308#公变具体参数：S9-315/10，容量为 315kVA，Yyn0 型，一次侧分接头可调范围 $\pm 5\%$ 。上述仿真在中间分接头 0 位置下进行模拟，为使线路电压升高，将一次侧分接头调至 $-5\%$ ，即变比为 9.5/0.4。只调节分接头提升电压的结果如图 9 所示。

仿真结果表明：经过调节一次侧分接头，低电压户数有了明显的减少，从原来的 8 个小集中负荷节点减少至 4 个小负荷节点，所有节点电压均有所提高。据程序计算统计，改变分接头后，大约有 24.3475 个用户脱离低电压范围，调节之前处于低电压范围的 34.5173 个用户电压仍旧较低，电压波动在 360V~354V 之间。脱离低压区的用户均是距离主变较近的负荷，所以调节分接头，距离主变较近的负荷电压得以提升。

#### (2) 分接头加并联电容器调压

在已调整主变一次侧分接头的基础上，在配变二次侧集中装设 6.2kVar 并联电容器补偿装置。电容器补



偿即为无功补偿或功率因数补偿，一般的家用电设备为感性负荷，通过加装电容器，补偿电源的使用效率，能够有效提升电压。仿真结果如图 10 所示。

仿真结果表明：将调节一次侧分接头与加装并联补偿装置结合进行调压，基本上能够解决低电压的问题。从曲线最低点能够看到，虽然将所有用户的电压都调整到了允许范围内，但是部分负荷电压仍有所偏低。距离主变较近的负荷电压有所偏高，分布均匀程度并非十分合理。该方法适用于配电网无功不足，单独依赖调分接头电压难以凑效的场合。

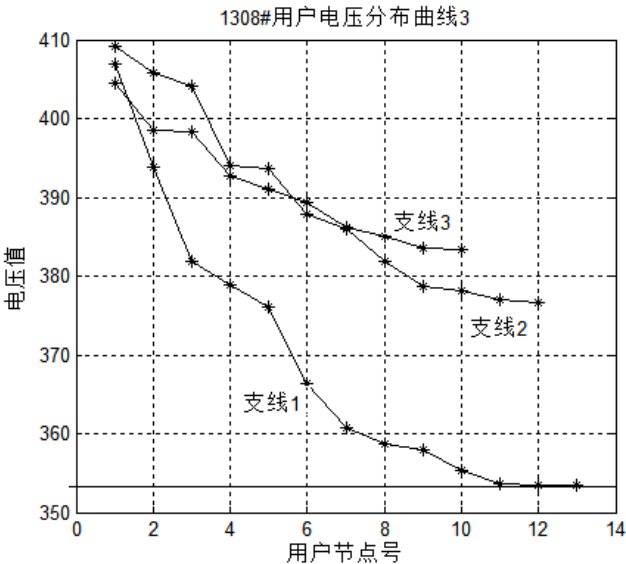


图 10 马三路 1308#公变调分接头加装并补后节点电压变化曲线

(3) 加装线路自动调压器调压

根据图 8 节点电压分布曲线，第一条分支线路低电压问题较为严重。初步拟定于小集中负荷节点 5 处安装线路自动调压器。由于调节 10kV 主变一次侧分接头，会使靠近主变的负荷电压更加偏高，所以加设调压器在分接头为 0 的位置下进行。调压器的容量根据所供负荷之和确定：已知低电压负荷之和为 45.7699kW，功率因数为 0.9，推算调压器容量至少为 50.855kVA。考虑市场实际情况，初步选择容量为 63kVA 的 VR-32 型自动调压器，一次侧分接头调节至-15%，即变比设置为 323/380。在 1308#公变一次侧调节分接头至-5%的基础上进行试验。设置调压器后的线路节点电压变化曲线如图 11 所示。

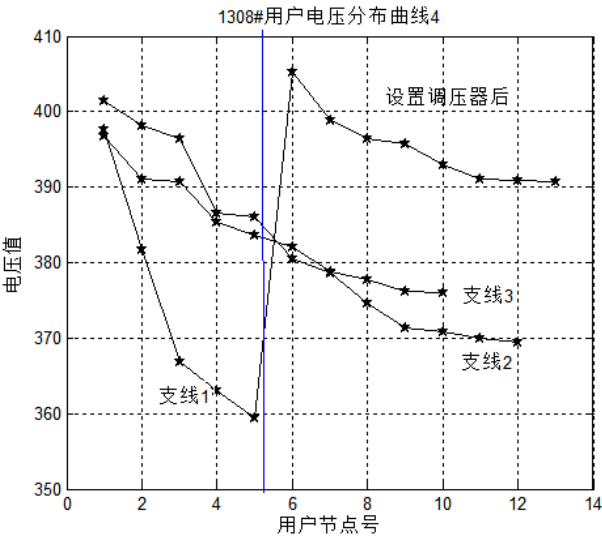


图 11 马三路 1308#公变加设线路自动调压器后的线路节点电压变化曲线

仿真结果表明：将调节一次侧分接头与线路加装调压器结合进行调压，基本上能够解决低电压的问题。从曲线趋势看出，第一条分支线串联线路调压器后，从第 6 个节点开始，电压很明显提高。基本上将所有用户的电压都调整到了允许范围内，而且靠近公变出线侧的用户电压不会偏高，满足规定波动范围。与加装并联电容补偿装置进行对比发现，线路调压器有突出优点，线路调压器不会使调压范围外的负荷电压偏高，但能够使处于低电压的负荷电压调至规定范围内。

线路调压器一般能在调压线路上连续加装，但前提是该线路负荷没有超过线路的额定容量。再者，若线路功率因数较低，可和并补结合调压，也可使用带有功率因数补偿的线路调压器，限于篇幅，这里就不赘述了。

由以上分析可知，对于轻载线路出现的低电压问题，一般通过上述三种方法或其组合均能解决问题，技术上简单可行，经济上合理划算。

## 4 结语

本文通过对黄化电网的运行特征分析，找出了低电压产生的原因和区域，并针对典型线路采用随机模拟方法提出了有效治理措施。仿真和实践结果表明所提出的方法是有效的和节俭的，是一种有效的治理措施。当然，针对典型案例的分析和治理措施也可以推广到其它类似场合，为国内边远地区农区牧区低电压治理提供经验和技术支持。

## REFERENCES

- [1] Hongsheng Su, Jianan Zhou. "Power Flow Calculation for Weakly Meshed Distribution Network with Distributed Generation Considering Static Load Characteristic." SYLWAN, 2016, 160(1):458-466
- [2] Electrical Power Economy Research Institute, Huanghua Supply Corporation, State Grid Corporation. "The Feasibility Study Report on Huanghua Zone Low voltage Control." Huanghua: Electrical Power Economy Research Institute, 2014
- [3] State Grid Corporation. A Typical Demonstration on Distribution Network "Low voltage" Governance. Beijing: China Electrical Power Press, 2015
- [4] State Grid Corporation. DL/T5118-2000. Rural PowerGrid Planning and Design Guideline. Beijing: China Electrical Power Press, 2000
- [5] Yongyuan Yu, Jiwen Yang. "Power System Analysis." Beijing, China Electrical Power Press, 2007
- [6] State Grid Corporation. DL/T5131-2001. Rural Power Grid Construction and Retrofit Technical Guidance. Beijing: China Electrical Power Press, 2001

### 【作者简介】

<sup>1</sup> 辛志刚（1970-），男，汉族，高级政工师，研究方向为供电网络及经济性；电力企业管理。Email:xinzg@sina.com

<sup>2</sup> 尹延麒（1973-），男，汉族，学士，研究方向为电力系统分析。

<sup>3</sup> 梁晓艳（1987-），女，汉，学士，助理工程师，研究方向为电力系统及其自动化。Email: 363583764@qq.com