

## 考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算

郑欣<sup>1</sup>, 陈文炜<sup>1</sup>, 林舜江<sup>2</sup>, 陈宏岩<sup>2</sup>, 梁立峰<sup>1</sup>, 梁超凡<sup>1</sup>

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提出了一种考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算方法。通过将泵类负荷的电动机转矩平衡方程和配电网各节点功率平衡方程组合起来, 构成了考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算模型。在求解配电网潮流计算的牛拉法的基础上, 提出通过将泵类负荷电动机转矩平衡方程与各节点功率平衡方程进行统一迭代和交替迭代两种方法进行求解。通过对实际低压配电网台区的计算分析, 验证了该方法能获得更加准确的配网负荷节点电压, 而且能够获得泵类负荷正常运行时和启动时的节点电压。

**关键词:** 潮流计算; 低压配电网; 泵类负荷; 感应电动机; 统一迭代法; 交替迭代法

### Power flow calculation of low voltage distribution network including pump loads

ZHENG Xin<sup>1</sup>, CHEN Wen-wei<sup>1</sup>, LIN Shun-jiang<sup>2</sup>, CHEN Hong-yan<sup>2</sup>, LIANG Li-feng<sup>1</sup>, LIANG Chao-fan<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** This paper presents a method of power flow calculation for low voltage distribution network including pump loads. By combining torque balancing equations of induction motors in pump loads and power balance equations of each node in distribution network, the low-voltage distribution network power flow calculation model including pump load characteristics is constituted. Based on the Newton-Raphson algorithm of solving the distribution network power flow calculation, two methods of uniform iteration and alternating iteration of pump load motor torque balance equations with each node power balance equations are proposed to solve the problem. The numerical results of real low voltage distribution networks show that the proposed method can obtain load nodes voltage more accurately, and it can get the node voltage of pump loads during normal operation and startup.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207056) and The Young Creative Talents Training Project of Guangdong Higher Education (No. LYM11014).

**Key words:** power flow calculation; low voltage distribution network; pump loads; induction motors; uniform iterative method; alternating iterative method

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0025-07

## 0 引言

目前我国农村地区居民用户受电端的电压合格率还比较低, 只有90%左右, 对用户的正常用电产生了很大影响<sup>[1]</sup>。尤其是以农业负荷为主的低压配电网台区, 如一些鱼塘、虾塘等养殖业负荷, 含有大量的抽水泵、增氧泵等泵类负荷设备。由于水塘的面积较大, 低压配电线路的长度较长, 电压损耗较大, 当负荷点离配电变压器的距离较远时, 经常会出现由于电压过低而造成泵类负荷设备的感应电

动机启动转矩过小而无法启动。

根据我国相关技术导则规定的用户受电端供电电压允许偏差值, 对于低压配电网220V单相供电电压允许偏差为额定电压的+7%和-10%。为了衡量低压配电网各个用户受电端电压是否满足用电电压质量要求, 必须准确地确定低压配电网中各个负荷点的电压分布情况, 这可以通过低压配电网的潮流计算来获得。

对于低压配电网, 由配变低压侧引出的各条馈线之间往往是放射式网络结构, 而每一条馈线则是树状或干式网络结构, 并且配电线路的电阻与电抗的比值较大, 这与高压电网有着明显不同, 其潮

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51207056); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM11014)

流计算也具有自身的特点。配电网潮流计算按照采用系统状态变量的不同,可分为节点法和回路法,节点法以节点注入功率和节点电压为状态变量列出系统方程,回路法以回路电流或功率为状态变量列出系统方程<sup>[2]</sup>。配电网潮流计算的常用求解算法有牛拉法、改进牛拉法、前推回代法、回路阻抗法、隐式  $Z_{bus}$  高斯法等<sup>[3-12]</sup>。在上述这些配网潮流计算中,负荷基本都是采用恒功率模型,但是,恒功率模型并不能准确反映实际配网中负荷吸收功率随负荷节点电压的变化而改变的特性。也有文献研究考虑负荷特性的配网潮流计算,不过只采用一般性的负荷特性模型,如幂函数模型、多项式模型<sup>[13-15]</sup>。显然,这些已有的配网潮流计算方法都没有专门考虑泵类负荷特性,因而对于以鱼塘、虾塘等养殖业负荷为主的低压配网台区,直接应用这些方法将无法得到准确的配网台区电压和潮流分布,且无法反映泵类负荷在正常运行和通电启动不同工况下配网台区的电压和潮流分布。

本文在分析泵类负荷特性和稳态模型的基础上,提出一种考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算方法。首先构建了考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算模型,并在求解配电网潮流计算的牛拉法的基础上,提出通过将泵类负荷电动机转矩平衡方程与各节点功率平衡方程进行统一迭代和交替迭代两种方法进行求解。通过对实际低压配网台区的计算,验证了该方法的正确有效。

## 1 泵类负荷的特性和模型

泵类负荷主要由感应电动机组成,在稳态运行条件下,其等值电路如图1所示。

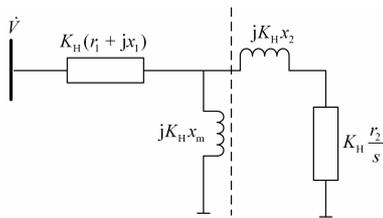


图1 感应电动机接入系统的稳态等值电路

Fig. 1 Steady state equivalent circuit of induction motor

其中:  $\dot{V}$  为泵类负荷接入配电网处的节点电压;  $r_1$ 、 $x_1$ 、 $r_2$ 、 $x_2$  和  $x_m$  分别为感应电动机的定子电阻、定子电抗、转子电阻、转子电抗和激磁电抗;  $s$  为感应电动机的转差率;  $K_H$  为容量折算比,即系统容量基值与感应电动机自身容量之比,表达式如式(1)。

$$K_H = \frac{S_B}{S_{BM}} \quad (1)$$

其中:  $S_B$  为系统容量基值;  $S_{BM}$  为接入某一节点的

泵类负荷感应电动机的总容量。

感应电动机负荷的等值阻抗  $R_{im} + jX_{im}$  是转差率  $s$  的函数,如式(2);而感应电动机负荷从电网吸收的功率值  $P + jQ$  可由负荷节点电压和等值阻抗计算得到,如式(3)。

$$R_{im} + jX_{im} = K_H(r_1 + jx_1) + jK_H x_m // (K_H r_2 / s + jK_H x_2) \quad (2)$$

$$P + jQ = \frac{V^2}{R_{im} - jX_{im}} = \frac{V^2(R_{im} + jX_{im})}{R_{im}^2 + X_{im}^2} \quad (3)$$

感应电动机的转子运动方程为

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j}(P_m - P_e) \quad (4)$$

其中:  $T_j$  为感应电动机转子的惯性时间常数;  $P_m$  为感应电动机在系统基准下的机械负载功率,其表达式如式(5)。

$$P_m = \frac{K_L[a + (1-a)(1-s)^n]}{K_H} \quad (5)$$

其中:  $K_L$  为负载率;  $a$  为机械负载中与转速无关部分所占的百分率;  $n$  为负载指数。

通过对图1中虚线左边部分进行戴维南等值,等值电势为  $\dot{E}_{eq}$ , 等值阻抗为  $R_{eq} + jX_{eq}$ , 则感应电动机在系统基准下的电磁功率如式(6)。

$$P_e = \frac{E_{eq}^2 K_H \frac{r_2}{s}}{(R_{eq} + K_H \frac{r_2}{s})^2 + (X_{eq} + K_H x_2)^2} \quad (6)$$

其中,等值阻抗和等值电势的表达式为

$$R_{eq} + jX_{eq} = K_H(r_1 + jx_1) // jK_H x_m \quad (7)$$

$$\dot{E}_{eq} = \frac{\dot{V}}{K_H(r_1 + jx_1)}(R_{eq} + jX_{eq}) \quad (8)$$

在稳态运行条件下,  $P_m - P_e = 0$ , 即

$$\frac{K_L[a + (1-a)(1-s)^n]}{K_H} - \frac{E_{eq}^2 K_H \frac{r_2}{s}}{(R_{eq} + K_H \frac{r_2}{s})^2 + (X_{eq} + K_H x_2)^2} = 0 \quad (9)$$

在已知泵类负荷节点电压  $\dot{V}$  的情况下,由式(9)

即可计算得到感应电动机的转差率值  $s$ 。

## 2 含泵类负荷特性的低压配电网潮流计算

### 2.1 低压配电网潮流计算模型

在含泵类负荷特性的低压配电网潮流计算中,对于功率恒定的普通负荷节点,功率平衡方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i = -P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = -Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

而对于泵类负荷节点, 功率平衡方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i = -\frac{V_i^2 R_m}{R_m^2 + X_m^2} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = -\frac{V_i^2 X_m}{R_m^2 + X_m^2} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

显然, 对于泵类负荷节点, 除了有节点电压幅值和相角两个未知数外, 还有电动机转差率  $s$  这个未知量, 故须增加一个方程潮流计算才有定解, 该方程就是式(9)所描述的感应电动机的功率(转矩)平衡方程。因此, 和配电网各节点功率平衡方程式(10)、式(11)组合起来, 就构成了考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算模型。

当某个泵类负荷节点感应电动机启动时, 转速为 0, 对应转差率值  $s=1.0$ , 为已知量, 感应电动机负荷的等值阻抗也可立即得到。此时, 该节点只需直接采用式(11)的功率平衡方程参与潮流计算, 而不需要加入泵类负荷的感应电动机转矩平衡方程(9)。

## 2.2 低压配电网潮流计算方法

显然, 考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算模型是一组非线性代数方程组, 可采用牛-拉法进行迭代求解。本文提出统一迭代法和交替迭代法两种方法进行求解。

### (1) 统一迭代法

统一迭代法通过将泵类负荷电动机转矩平衡方程与各节点功率平衡方程统一进行迭代求解, 其核心是反复求解线性化修正方程以获得节点电压幅值和相角、以及泵类负荷电动机转差率的修正量, 不断对未知量进行修正以最终收敛到方程的解, 修正方程如式(12)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} & \frac{\partial \Delta P}{\partial s} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial s} \\ \frac{\partial \Delta P_T}{\partial \theta} & \mathbf{V} \frac{\partial \Delta P_T}{\partial V} & \frac{\partial \Delta P_T}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:  $\Delta P_T$  是由各个泵类负荷电动机的功率(转矩)不平衡量所组成的向量; 雅可比矩阵中的子矩阵  $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{L}$  的物理意义和表达式与常规潮流计算相同, 可参见文献[16], 子矩阵  $\frac{\partial \Delta P_T}{\partial \theta} = \mathbf{0}$ , 而子矩阵

$\mathbf{V} \frac{\partial \Delta P_T}{\partial V}$  和  $\frac{\partial \Delta P_T}{\partial s}$  都为对角矩阵, 其对角线元素的表达式如式(13)和式(14)。

$$V_i \frac{\partial \Delta P_{Ti}}{\partial V_i} = - \frac{2E_{\text{eqf}}^2 K_{Hi} \frac{r_2}{s_i}}{(R_{\text{eqf}} + K_{Hi} \frac{r_2}{s_i})^2 + (X_{\text{eqf}} + K_{Hi} x_2)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{Ti}}{\partial s_i} = \frac{-K_{Hi} n(1-a)(1-s_i)^{n-1}}{K_{Hi}} \frac{-E_{\text{eqf}}^2 K_{Hi} \frac{r_2}{s_i^2}}{(R_{\text{eqf}} + K_{Hi} \frac{r_2}{s_i})^2 + (X_{\text{eqf}} + K_{Hi} x_2)^2} - \frac{2E_{\text{eqf}}^2 K_{Hi} \frac{r_2}{s_i} (R_{\text{eqf}} + K_{Hi} \frac{r_2}{s_i}) K_{Hi} \frac{r_2}{s_i^2}}{[(R_{\text{eqf}} + K_{Hi} \frac{r_2}{s_i})^2 + (X_{\text{eqf}} + K_{Hi} x_2)^2]^2}$$

(14)

子矩阵  $\frac{\partial \Delta P}{\partial s}$  和  $\frac{\partial \Delta Q}{\partial s}$  中只有泵类负荷节点的功率不平衡量对于该节点电动机转差率的导数值才不为零, 表达式如式(15)。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial s_i} = - \frac{V_i^2 \frac{\partial R_m}{\partial s_i} (R_m^2 + X_m^2) - 2V_i^2 R_m (R_m \frac{\partial R_m}{\partial s_i} + X_m \frac{\partial X_m}{\partial s_i})}{(R_m^2 + X_m^2)^2} \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial s_i} = - \frac{V_i^2 \frac{\partial X_m}{\partial s_i} (R_m^2 + X_m^2) - 2V_i^2 X_m (R_m \frac{\partial R_m}{\partial s_i} + X_m \frac{\partial X_m}{\partial s_i})}{(R_m^2 + X_m^2)^2} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\frac{\partial R_m}{\partial s_i}$  和  $\frac{\partial X_m}{\partial s_i}$  的表达式如式(16)。

$$\begin{cases} \frac{\partial R_m}{\partial s_i} = \frac{K_{Hi} x_m^2 r_2 [r_2^2 - (x_m + x_2)^2 s_i^2]}{[r_2^2 + (x_m + x_2)^2 s_i^2]^2} \\ \frac{\partial X_m}{\partial s_i} = \frac{2K_{Hi} x_m x_2 (x_m + x_2) s_i}{r_2^2 + (x_m + x_2)^2 s_i^2} - \frac{2K_{Hi} x_m [x_2 (x_m + x_2) s_i^2 + r_2^2] s_i (x_m + x_2)^2}{[r_2^2 + (x_m + x_2)^2 s_i^2]^2} \end{cases} \quad (16)$$

### (2) 交替迭代法

交替迭代法在给定各个节点电压幅值和相角、以及泵类负荷电动机转差率的初值的基础上, 先假定泵类负荷节点电压已知, 采用牛顿法求解泵类负荷的感应电动机转矩平衡方程(9), 获得电动机转差率; 再以电动机转差率为已知量算得电动机负荷的

等值阻抗, 并采用牛-拉法求解普通配网潮流计算获得各个节点电压幅值和相角; 如此交替迭代直至收敛到最终的节点电压幅值和相角、以及电动机转差率。其计算程序流程图如图 2。

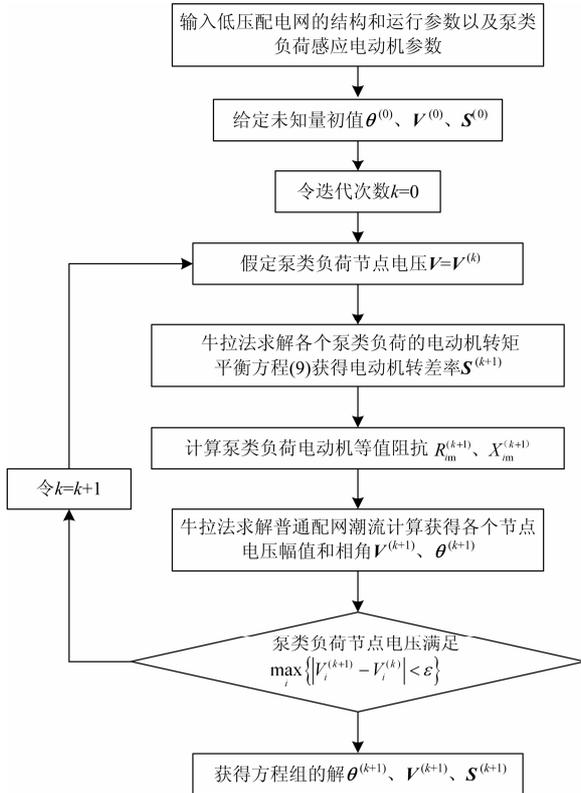


图 2 交替迭代法配网潮流计算程序流程图

Fig. 2 Flow chart for distribution network power flow calculation procedure of alternating iterative method

显然, 统一迭代法必须对已有的牛-拉法配网潮流计算进行扩展修改, 才能用于考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算; 而交替迭代法则将已有的牛-拉法配网潮流计算中泵类负荷等值阻抗当成转差率  $s$  的函数, 只需通过求解各个泵类负荷的感应电动机转矩平衡方程获得电动机转差率  $s$  并传递过来就行, 改动相对要小很多。

### 3 算例分析

为验证所提出考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算方法的正确性和有效性, 本文对广州市南沙区的多个以农业灌溉负荷为主的低压配网台区进行了计算, 程序用 Basic 语言编写, 在 VB 6.0 环境中运行, 计算机配置为 Intel (R) Core(TM) i3-3220 (3.3 GHz), 4 G 内存。下面重点阐述小虎村 10#低压配网台区的潮流计算情况。

小虎村 10#低压配网台区的结构如图 3, 各元件的参数如下: (1)配电变压器为 S9-200 型, 该型号变压器的短路损耗为 2.5 kW, 短路电压百分数为 4, 容量为 200 kVA, 变比为 10/0.4 kV。由以上参数可以得到变压器的漏磁电阻和漏磁电抗如表 1 所示, 变压器励磁支路的电导和电纳比较小, 且以配变高压侧为平衡节点时其大小并不影响台区中 380 V 等级部分的电压和功率分布, 故忽略。(2)各输电线路的型号、长度和截面积如图 3, 由于 BVV 型号导线为铜线, 故取电阻率为  $\rho=0.0175(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$ , 并结合各段线路的长度和截面积, 即可计算得到各段线路的电阻, 并根据低压配网特点假定线路的电抗为电阻的 1/5, 最终得到各线路阻抗如表 1 所示。(3) 负荷节点 1~5 的功率如表 2; 泵类负荷节点 6~9 的电动机额定功率如表 3, 额定功率因数都取为 0.87, 效率取为 0.92, 即可获得节点 6~9 的电动机总容量如表 3。

表 1 支路阻抗参数

Table 1 Impedance of each branch

支路	首端节点	末端节点	R/Ω	X/Ω
1	11	10	6.125	20
2	10	1	0.082	0.016 4
3	10	2	0.052	0.010 4
4	2	3	0.070	0.014 0
5	3	4	0.150 5	0.030 1
6	2	5	0.070	0.014 0
7	5	6	0.166 0	0.033 3
8	6	7	0.142 0	0.028 4
9	5	8	0.030	0.006
10	8	9	0.108	0.021 6

表 2 负荷节点功率

Table 2 Power of loads

节点	有功/kW	无功/kvar
1	39.148 6	24.262 1
2	0.127 8	0.079 2
3	1.533	0.950 1
4	2.658 3	1.647 5
5	20.243 1	12.545 5

表 3 泵类负荷节点电动机的额定功率和总容量

Table 3 Power of loads

节点	额定功率/kW	总容量/kVA
6	21	26.237
7	15	18.741
8	27	33.733
9	45	56.222

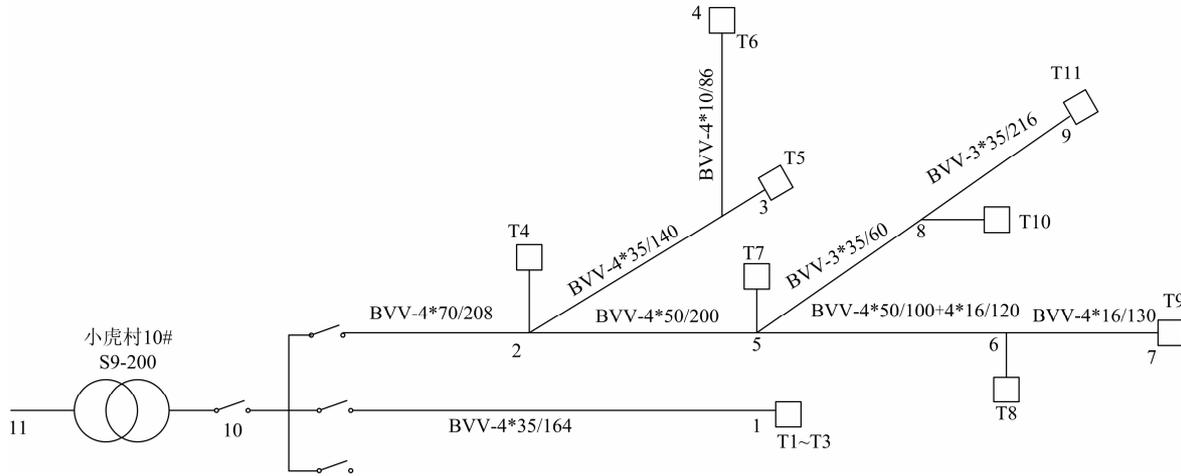


图3 小虎村10#低压配网台区的结构图

Fig. 3 Structure of Xiaohu village 10# low voltage distribution network

潮流计算中泵类负荷电动机的参数值采用IEEE标准负荷模型中的小型感应电动机模型典型参数值<sup>[17]</sup>,如表4;选节点11为平衡节点,电压模值为10.3 kV,相角为0;潮流计算采用标幺值,电网基准功率选为100 kVA,配变两侧的电压基准分别为10 kV和380 V。

表4 泵类负荷电动机的参数值

Table 4 Parameters of induction motor of pump loads

$r_1$	$x_1$	$r_2$	$x_2$	$x_m$	$a$	$n$	$K_L$
0.031	0.1	0.018	0.18	3.2	0.15	2	0.6

统一迭代法和交替迭代法配网潮流计算的结果完全一致,如表5所示,表明了运算结果的正确合理。统一迭代法经过4次迭代收敛,运行时间为0.015 s;交替迭代法经过7次交替后收敛,每次交替中配网潮流迭代3次后收敛,4个泵类负荷的感应电动机转矩平衡方程迭代1到2次就收敛,总运行时间为0.281 s。可见,统一迭代法的收敛性和运行时间都要明显优于交替迭代法。另外,表5中结果还表明,由于节点6~9位于线路末端,距离配变较远,且负荷比较重,线路电压损耗相对较大,造成负荷受电端电压偏低。

当节点9的泵类负荷电动机启动而其他3个泵类负荷电动机正常运行时,配网潮流计算结果如表6所示,可以看到节点5~9的电压都有明显下降,尤其是节点9电压下降到只有0.788 p.u.,低于额定电压的80%,不符合电动机启动时的配电母线电压规定,无法保证该泵类负荷电动机的可靠启动<sup>[18]</sup>。同样,当节点6、7的泵类负荷电动机启动而其他2个泵类负荷电动机正常运行时,配网潮流计算结果

表5 低压配电网潮流计算结果

Table 5 Results of low voltage distribution network power flow calculation

节点	电压标幺值	电压有名值/V	电动机转差率
1	1.029	391.055	-
2	1.006	382.279	-
3	1.004	381.412	-
4	1.001	380.229	-
5	0.945	359.063	-
6	0.906	344.179	0.015 1
7	0.892	338.844	0.015 6
8	0.931	353.750	0.014 2
9	0.899	341.672	0.015 3
10	1.053	400.297	-
11	1.03	10 300	-

如表7所示,可以看到节点7电压下降到只有0.786 p.u.,也无法保证该泵类负荷电动机的可靠启动。因此,采用考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算方法得到的结果能够较好地解释该台区中有时出现用户的泵类负荷电动机无法启动,进而向供电局提出投诉的原因。

为保证配网台区中泵类负荷电动机的可靠启动,可通过在负荷点安装低压并联无功补偿装置以提高电压支撑能力<sup>[19]</sup>。补偿容量设置为电动机容量的70%左右,在节点6~9分别安装了20 kvar、15 kvar、25 kvar、40 kvar的并联电容器组后,当节点9的泵类负荷电动机启动时的潮流计算结果如表6,而当节点6、7的泵类负荷电动机启动时的潮流计算结果如表7,可见,两种情况下各泵类负荷节点的端电压都达到0.84 p.u.以上,明显超过额定电压的

80%，符合电动机启动时的配电母线电压规定，可以保证这些泵类负荷电动机的可靠启动。

表6 节点9泵类负荷电动机启动的配电网潮流计算结果  
Table 6 Results of distribution network power flow calculation with the start up of induction motor of bus 9

节点	无并联无功补偿		安装并联无功补偿	
	电压 标么值	电动机转 差率	电压 标么值	电动机 转差率
1	0.999	-	1.016	-
2	0.952	-	0.983	-
3	0.950	-	0.980	-
4	0.946	-	0.977	-
5	0.863	-	0.909	-
6	0.820	0.019 0	0.876	0.016 3
7	0.804	0.019 9	0.864	0.016 8
8	0.840	0.017 9	0.890	0.015 7
9	0.788	1.0	0.842	1.0
10	1.024	-	1.041	-
11	1.03	-	1.03	-

表7 节点6、7泵类负荷电动机启动配电网潮流计算结果  
Table 7 Results of distribution network power flow calculation with start up of induction motors of bus 6 and 7

节点	无并联无功补偿		安装并联无功补偿	
	电压 标么值	电动机 转差率	电压 标么值	电动机 转差率
1	1.005	-	1.022	-
2	0.962	-	0.992	-
3	0.960	-	0.990	-
4	0.956	-	0.987	-
5	0.877	-	0.923	-
6	0.807	1.0	0.861	1.0
7	0.786	1.0	0.842	1.0
8	0.862	0.016 9	0.911	0.014 8
9	0.827	0.018 6	0.884	0.015 9
10	1.030	-	1.047	-
11	1.03	-	1.03	-

## 4 结论

本文提出了一种考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算方法，以准确地获得以农业灌溉负荷为主的低压配网台区中电压和功率的分布情况，并提出通过统一迭代和交替迭代两种算法进行求解，通过算例分析获得结论如下：

(1) 统一迭代法需要对已有的牛-拉法配电网潮流计算程序进行较大的扩展修改，不过收敛性好，收敛速度快；交替迭代法虽然易于编程实现，但程序运行需要较长时间才能收敛。

(2) 本文方法能够获得泵类负荷正常运行时和启动时的节点电压，进而可根据启动时配网的电

压分布情况确定负荷点的并联电容补偿容量，以保证泵类负荷能够正常启动。

## 参考文献

- [1] 电监会发布全国农村地区供电可靠率和居民用户受电端电压[EB/OL]. [http:// roll.sohu.com/20120112/n331976228.shtml](http://roll.sohu.com/20120112/n331976228.shtml)
- [2] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [3] ZHANG F, CHENG C. A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [4] 顾洁, 陈章潮, 徐蓓. 一种新的配电网潮流算法——改进牛顿-拉夫逊法[J]. 华东电力, 2000, 28(5): 10-12.
- [5] 王振树, 林梅军, 刘岩. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.  
WANG Zhen-shu, LIN Mei-jun, LIU Yan. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [6] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on convergence of back/forward sweep distribution power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [7] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 77-81.  
YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 77-81.
- [8] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 63-66.  
LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, et al. Back/forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-66.
- [9] 刘莉, 赵璇, 姜新丽. 基于层次矩阵的配电网拓扑分析与潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 91-94.  
LIU Li, ZHAO Xuan, JIANG Xin-li. Distribution network topology analysis and flow calculation based on layer matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 91-94.
- [10] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.

- ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [11] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems[J]. Proceedings of IEE, Part C, 1991, 138(1): 78-88.
- [12] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J, et al. Distribution system power flow analysis-a rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152
- [13] 朱星阳, 张建华, 刘念, 等. 适用于计及负荷电压静态特性的配网潮流新型前推回代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 93-97.  
ZHU Xing-yang, ZHANG Jian-hua, LIU Nian, et al. A new back/forward sweep algorithm for power flow calculation in distribution network considering load static voltage characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 93-97.
- [14] MISTRY K D, ROY R. Load flow solution for ill-condition radial distribution network including static load model and daily load values[C] // 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011: 1-4.
- [15] 田书, 王丽. 考虑负荷类型的配电网改进牛顿潮流算法[J]. 工矿自动化, 2013, 39(9): 79-83.  
TIAN Shu, WANG Li. Improved Newton algorithm for power flow calculation of distribution grid considering load type[J]. Industry and Mine Automation, 2013, 39(9): 79-83.
- [16] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(下)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [17] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Standard load model for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1302-1313.
- [18] 中国机械工业联合会. GB50055-2011 通用用电设备配电设计规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [19] 胡泽春, 钟明明, 王佳贤. 考虑多负荷水平的中低压配电网无功补偿优化规划[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 167-173.  
HU Ze-chun, ZHONG Ming-ming, WANG Jia-xian. Optimal reactive power compensation for medium and low voltage distribution network considering multiple load levels[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 167-173.

收稿日期: 2014-01-04; 修回日期: 2014-02-15

作者简介:

郑欣(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力设备运行与控制;

陈文炜(1974-), 男, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为配电设备运行与管理;

林舜江(1980-), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: linshj@scut.edu.cn