

DOI: 10.7667/PSPC180032

# 考虑带泵类负载感应电动机影响的静态电压稳定性分析

初 壮<sup>1</sup>, 孙陶然<sup>1</sup>, 雷振伍<sup>2</sup>, 黄大为<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 北方工业大学电气与控制工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 为了更准确地计及泵类负载机械特性对配电网静态电压稳定的影响, 建立了一种将感应电动机 T 型等效电路与泵类负载机械特性相结合的感应电动机负荷模型。将其用于配电网潮流计算, 采用前推回代法求解。进而将其用于连续潮流计算, 建立了带泵类负载多台相同感应电动机的等效负荷模型, 分析负荷连续增长对配电网静态电压稳定的影响。采用 IEEE33 节点算例对提出的模型与方法进行仿真实验, 并与负荷按恒功率因数增加模型的连续潮流进行了对比。仿真计算验证了所提方法的合理性和有效性, 表明采用该模型所得的静态电压稳定裕度要小于采用恒功率因数负荷计算结果, 更接近工程实际情况。

**关键词:** 泵类负载; 静态电压稳定性; 感应电动机; 负荷模型; 连续潮流法

## Static voltage stability analysis considering the influence of pump loads induction motor

CHU Zhuang<sup>1</sup>, SUN Taoran<sup>1</sup>, LEI Zhenwu<sup>2</sup>, HUANG Dawei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Electrical and Control of Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** In order to consider the influences of induction motors with pump loads on the static voltage stability of distribution networks more accurately, a load model of an induction motor is established, which combines the T-type equivalent circuit of induction motors with the mechanical characteristics of pump loads. The model is incorporated into the power flow computation of distribution networks, then the back/forward sweep method is used to solve the power flow. Furthermore, the proposed load model is adapted for Continuation Power Flow (CPF), and an equivalent load model of a number of identical induction motors with pump loads is deduced, the load model is used to analyze the effect of continuous load growth on the static voltage stability of the distribution networks. IEEE 33-bus test system is used to verify the proposed model and method, and the results are compared with the ones acquired with the CPF method with constant power factor load mode. The simulations verify the validity and effectiveness of the proposed method, and show that the static voltage stability margin with the load model proposed in this paper is less than that with the constant power factor load model, the proposed load model is more approximate to actual engineering conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61473002) and Special Project of State Grid Sichuan Electric Power Company (No. 521909160001).

**Key words:** pump load; static voltage stability; induction motor; load model; continuation power flow method

## 0 引言

电力系统负荷不断增长, 负荷特性对电力系统静态电压稳定的影响越来越受到人们的重视。感应电动机负荷在电力负荷中所占比例较大, 在工业负荷中, 比例更是高达 90%以上<sup>[1]</sup>, 感应电动机负荷

的负荷特性对电力系统静态电压稳定的影响不可忽视。

连续潮流是研究系统静态电压稳定性的有效方法之一。在传统的连续潮流算法中, 一般是基于恒功率因数负荷<sup>[2-4]</sup>, 但是电网负荷成分复杂, 在研究中恒功率因数负荷不能准确等效实际电力负荷。故一些计及负荷电压静特性<sup>[5-7]</sup>的模型被广泛使用, 例如 ZIP 模型、幂函数模型等。电压等级越高, 综合负荷规模越大, 这些等效模型的准确性越高。但在

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61473002); 国网四川省电力公司专项课题项目资助(521909160001)

低压配电网中,不同节点上的负荷性质差异较大,采用这些等效模型对配电网进行计算分析的结果与实际情况出入较大。

智能电网<sup>[8-10]</sup>技术的发展为更准确掌握负荷构成提供了有效的技术手段。随着电力负荷数据日趋完善,直接在低压配电系统计算分析采用用电设备模型成为可能和现实。现在有两种将感应电动机直接计入到潮流中的模型,一种是感应电动机暂态模型,也就是考虑机电暂态过程中三阶感应电动机模型以满足电力系统电压稳定性分析的要求<sup>[11-12]</sup>,另一种是感应电动机的稳态模型,也就是感应电动机的 T 型等效电路。

T 型等效电路用可变电阻对机械负载进行等效,可变电阻的数值取决于感应电动机与机械负载之间的相互作用,因此,准确计入负荷影响应考虑机械负载特性。在生产生活中,很大一部分感应电动机拖动泵类机械负载进行工作,如水泵<sup>[13]</sup>、油泵、离心式通风机等,以上两种模型都没有直接将泵类负载机械特性计入负荷模型。文献[14]中虽然研究了泵类负载机械特性,但是研究也仅是针对感应电动机本身的特性进行研究,而且也没有研究随着感应电动机数量增加对系统静态电压稳定性的影响,缺少实际意义。

本文将感应电动机机械特性与泵类机械负载机械特性相结合进行建模分析,并将这个模型直接应用到连续潮流计算中,分析系统的静态电压稳定性,其中负荷的增长方式为按感应电动机数量逐渐增加的方式。这种感应电动机建模方式以及负荷增长方式更能反映负荷实际。

## 1 带泵类负载的感应电动机的机械特性

### 1.1 感应电动机固有机械特性

感应电动机固有机械特性的定义是:感应电动机按照规定的接线方式,外加额定频率和额定电压,当定、转子回路不串接任何电路元件时,感应电动机转矩  $T_e$  与转速  $n$  之间的关系<sup>[15]</sup>。

感应电动机固有机械特性曲线是根据感应电动机的 T 型等效电路得到的。感应电动机的参数确定, T 型等效电路确定,其机械特性曲线也就是确定的。感应电动机 T 型等效电路如图 1 所示,机械特性曲线如图 2 所示。其中:  $U_1$  为感应电动机负荷点电压;  $R_1$ 、 $X_1$  为定子绕组的电阻和漏电抗;  $R_2$ 、 $X_2$  (已归算)为转子绕组的电阻和漏电抗;  $R_m$  表示与定子铁心损耗相对应的励磁电阻;  $X_m$  表示与主磁通相对应的铁心磁路的励磁电抗;  $s$  为感应电动机转差率。

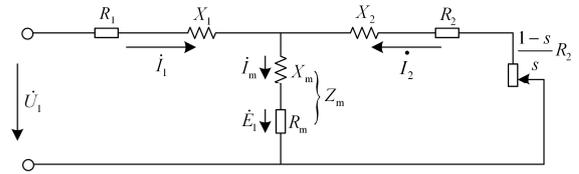


图 1 感应电动机 T 型等效电路

Fig. 1 Induction motor T-type equivalent circuit

由图 1 的感应电动机 T 型等效电路可以得到感应电动机转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{\Omega_s} m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (1)$$

式中:  $\Omega_s$  为同步机械角速度,其表达式如式(2);  $m_1$  为感应电动机相数;  $I_2$  为 T 型等效电路转子侧电流。

$$\Omega_s = 2\pi n_s / 60 \quad (2)$$

$$n_s = 60f / p \quad (3)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

式中:  $n_s$  为同步转速;  $p$  为感应电动机极数;  $n$ 、 $s$  分别为转子的转速和转差率。

感应电动机 T 型等效电路的等值阻抗  $Z_{eq}$  是转差率  $s$  的函数,如式(5)。

$$Z_{eq} = (R_1 + jX_1) + (R_m + jX_m) // (R_2 + jX_2 + \frac{1-s}{s} R_2) \quad (5)$$

感应电动机 T 型等效电路定子侧电流  $I_1$ 、励磁支路与转子侧电势  $E_1$ 、转子侧电流  $I_2$ 、励磁支路电流  $I_m$  如式(6)一式(9)所示。

$$I_1 = U_1 / Z_{eq} \quad (6)$$

$$E_1 = U_1 - I_1 (R_1 + jX_1) \quad (7)$$

$$I_2 = E_1 / (X_2 + R_2 + \frac{1-s}{s} R_2) \quad (8)$$

$$I_m = E_1 / (R_m + jX_m) \quad (9)$$

由式(1)、式(5)一式(9)可见,电磁转矩  $T_e$  是电压  $U_1$  和转差率  $s$  的函数,把这一关系简记为

$$T_e = T_e(\dot{U}_1, s) \quad (10)$$

而感应电动机消耗的有功功率  $P_i$ 、无功功率  $Q_i$  分别为

$$P_i = I_1^2 R_1 + I_m^2 R_m + \Omega_s T_e \quad (11)$$

$$Q_i = I_1^2 X_1 + I_m^2 X_m + I_2^2 X_2 \quad (12)$$

它们也是  $U_1$  和  $s$  的函数,把这一关系简记为

$$P_i = P_i(\dot{U}_1, s) \quad (13)$$

$$Q_i = Q_i(\dot{U}_1, s) \quad (14)$$

## 1.2 泵类负载机械特性

属于泵类负载的生产机械有水泵、油泵、离心式通风机等。泵类负载的转矩基本与转速的二次方成正比, 实际的机械负载还有一定的摩擦转矩  $T_0$ , 即

$$T_z = T_0 + Kn_s^2(1-s)^2 \quad (15)$$

式中,  $K$  为泵类负载机械特性的比例系数, 为常数。式(15)的负载转矩与转速的关系体现在坐标系中位于第一象限并穿过横轴的一条抛物线。

## 1.3 感应电动机的稳定运行点的确定

在生产中, 电动机的机械特性与生产机械的机械特性应合理配合, 特性配合好的一个基本要求就是系统能够稳定运行<sup>[16]</sup>。感应电动机机械特性曲线随着电压的变化而变化, 而泵类负载机械特性曲线是固定不变的。将不同电压下的感应电动机电磁转矩曲线与泵类负载机械转矩曲线绘制在同一个图中, 如图2所示。

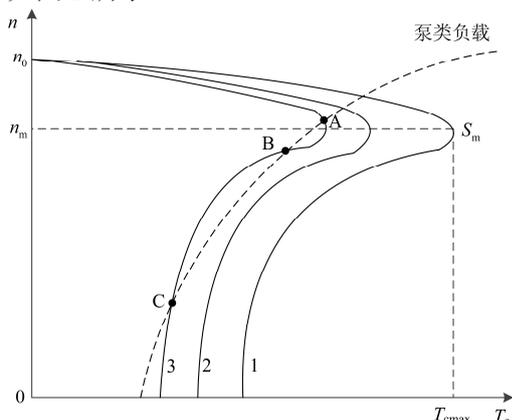


图2 感应电动机机械特性与泵类负载机械特性相配合

Fig. 2 Induction motor mechanical properties and pump loads mechanical properties match

由图2可见, 泵类负载机械转矩曲线和感应电动机电磁转矩曲线相交存在两种情况: 一种情况是有一个交点(如曲线1、2); 另一种情况是有三个交点(如曲线3)。通过对感应电动机静态稳定性的分析可知, 当只有一个工作点存在时, 工作点稳定存在, 在有三个工作点的情况下, 交点B不稳定, 而其他两个交点(A和C)都是稳定的<sup>[17]</sup>。这个交点的值可由感应电动机电磁转矩方程与泵类负载转矩方程相联立求解, 即

$$T_c = T_z \quad (16)$$

## 2 计及泵类负载的配电网潮流

静态电压稳定分析方法的基本模型一般是潮流

方程或扩展潮流方程。常规潮流计算是研究电力系统稳态运行情况的一种基本电气计算, 是以节点电压  $V$  为变量的非线性代数方程组<sup>[18]</sup>。

### 2.1 极坐标下的常规潮流模型

#### 1) 等式约束条件

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为给定的节点注入功率;  $\Delta P_i$  表示第  $i$  节点的有功功率的不平衡量;  $\Delta Q_i$  表示第  $i$  节点的无功功率的不平衡量;  $U_i$ 、 $U_j$  是节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值;  $\theta_{ij}$  是节点  $i$ 、 $j$  电压相角差;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  是节点  $i$ 、 $j$  之间的网络导纳矩阵的实部和虚部。对于接入感应电动机的节点,  $P_i$ 、 $Q_i$  取为式(11)和式(12)。

#### 2) 不等式约束条件

##### (1) 所有节点电压幅值必须满足

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (18)$$

式中,  $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$  分别为  $i$  节点电压的上限和下限。

##### (2) 某些节点之间的电压相角差满足

$$|\theta_i - \theta_j| < |\theta_i - \theta_j|_{\max} \quad (19)$$

式中,  $\theta_i$ 、 $\theta_j$  分别为  $i$ 、 $j$  节点的功角。

### 2.2 配电网潮流计算

由于配电网<sup>[19]</sup>和高压输电网有很大差异, 配电网支路参数电阻和电抗的比值较大以及三相负荷不对称问题比较突出等, 使得在高压电网中经常使用的潮流算法, 像牛顿-拉夫逊法、PQ分解法在配电网潮流计算中不再适用<sup>[20-23]</sup>。目前, 很多适合配电网潮流的算法被提出, 主要方法有前推回代法、回路电流法、改进快速解耦法等。本文采用前推回代法来计算潮流, 并结合交替迭代的方法来求解。

交替迭代法先给定所有节点的电压幅值和相角, 由上述可知, 当泵类机械特性系数  $K$  确定后, 在给定感应电动机负荷节点电压初值之后, 可以得到此时电动机的转差率并可以求出此时负荷点的机械功率, 将这个机械功率代入到潮流中进行迭代, 每进行一次迭代, 潮流中的节点电压更新一次, 感应电动机的机械功率的值随之更新, 然后再重新将其代入到潮流中, 如此交替迭代直至收敛。具体计算步骤如下。

#### (1) 设置电动机所有节点电压初值 $U$ 。

(2) 根据式(1)一式(10)做出电动机机械特性曲线及泵类负载特性曲线, 这两条曲线横坐标为电磁转矩, 纵坐标为转速。

(3) 求出两条曲线交点坐标, 并算出交点处的电动机转差  $s$  和此时电动机的机械功率。

(4) 将感应电动机节点视为 PQ 节点求解整个系统的潮流, 从而可以得到电动机节点的电压更新值  $U'$ 。

(5) 如果  $|U' - U| < 10^{-4}$  不成立, 返回步骤(1)继续执行步骤(1)一步骤(4)。直到两次电压差值在规定误差范围之内。

### 3 计及泵类负载的配电网连续潮流

连续潮流法是研究系统静态电压稳定性<sup>[24]</sup>的有效方法之一, 通常将网络传输极限功率时的系统运行状态当作静态电压稳定的临界状态<sup>[25]</sup>。在分析静态电压稳定性的方法中, 连续潮流法是用来追踪当负荷改变时电力系统静态电压稳定性的有力工具。故在本文利用连续潮流法追踪 PV 曲线来分析感应电动机的静态电压稳定性。

在传统的连续潮流中并没有直接考虑感应电动机, 其负荷增长方式都是以恒功率因数增长。当连续潮流中直接计及感应电动机负荷时, 随着潮流迭代的进行, 稳定运行点电压从额定值下降, 导致电动机机械特性曲线左移, 两条曲线交点下降, 功率因数也随之下降, 感应电动机输出的机械功率变化, 即负荷的增长随功率因数的变化而变化。由于感应电动机的功率因数受电压变化影响会发生改变, 不宜将感应电动机简单地等效为恒功率负荷。因此, 基于前述带泵类负载感应电动机负荷模型, 本文提出一种改进的连续潮流模型。

#### 3.1 感应电动机数量逐渐增加时的潮流计算方法

本文利用连续潮流法分析系统的静态电压稳定性, 其中负荷增长方式为按感应电动机数量逐渐增加的方式, 即将  $n_{ind}$  ( $n_{ind}$  为正整数, ind 指的是感应电动机英译文前三个字母) 台感应电动机逐渐并联来逐渐增加负荷的方式, 并且所有感应电动机及泵类负载都完全相同。等效前后的等效电路如图 3 所示。

当系统只接入一台感应电动机时, 潮流计算步骤与 2.2 节相同。当系统接入  $n_{ind}$  台感应电动机时, 即  $n_{ind}$  台感应电动机并联后,  $n_{ind}$  台感应电动机等效为一台感应电动机。由图 3 所示, 等效后 T 型等效电路中的电阻、电抗参数变为原来的  $1/n_{ind}$ , 式(1)一式(10)中和电阻、电抗有关的参数都替换为  $1/n_{ind}$  的电阻、电抗。在采用感应电动机不同电压下的机械特性曲线与泵类负载机械特性曲线联立计算转差率  $s$  时, 只需计算单台电动机的情况: 在给定电压初值的情况下计算单台感应电动机稳定运行的转差

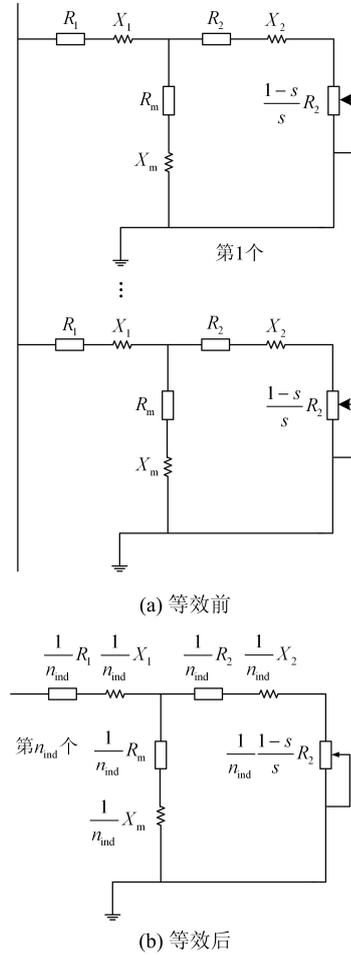


图 3  $n_{ind}$  台感应电动机并联

Fig. 3  $n_{ind}$  induction motors parallel

率  $s$ , 然后, 采用式(20)和式(21)计算  $n_{ind}$  台电动机的有功功率和无功功率作为潮流计算的节点有功功率和无功功率, 进而作潮流计算得到节点电压更新值, 重新计算单台感应电动机的转差率, 直到节点电压满足潮流收敛条件为止。

$$P_i = \frac{1}{n_{ind}} I_1^2 R_1 + \frac{1}{n_{ind}} I_m^2 R_m + n_{ind} \Omega_s T_e \quad (20)$$

$$Q_i = \frac{1}{n_{ind}} I_1^2 X_1 + \frac{1}{n_{ind}} I_m^2 X_m + \frac{1}{n_{ind}} I_2^2 X_2 \quad (21)$$

#### 3.2 计及感应电动机负荷改进连续潮流法基本步骤及算法流程图

基本步骤如下:

- (1) 根据电网原始数据, 求取基态潮流。
- (2) 感应电动机负荷节点的电动机数量置为  $n_{ind}=1$ 。
- (3) 用 3.1 节中的模型与方法计算感应电动机负荷节点接有  $n_{ind}$  台电动机时的配电网潮流。
- (4) 如果潮流计算收敛, 则增加感应电动机数

量,  $n_{\text{ind}}=n_{\text{ind}}+1$ , 返回步骤(3)继续迭代; 如果潮流计算不收敛, 说明系统已达到静稳极限。

(5) 根据  $n_{\text{ind}}$  从 1 逐渐增长, 直至潮流不收敛时的潮流计算数据, 做出 PV 曲线和 QV 曲线。

算法流程图如图 4 所示。

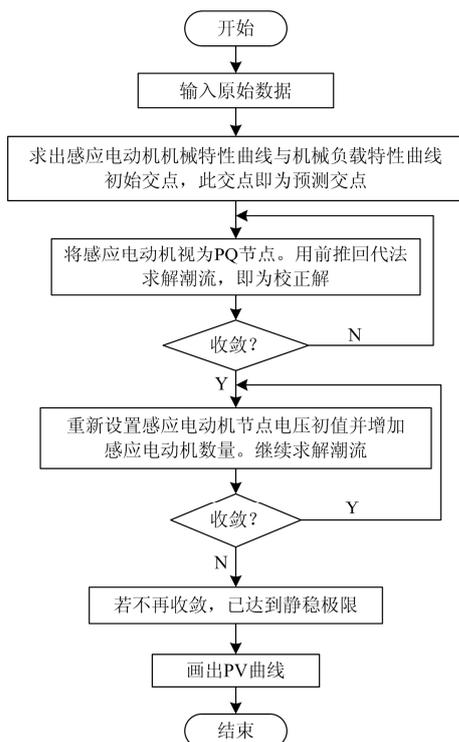


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

## 4 算例分析

本文选取 IEEE33 节点系统作为算例进行验证<sup>[26-28]</sup>, 网络结构图如图 5 所示。系统基准功率为 10 MVA, 电压等级是 12.66 kV。总有功负荷功率为 3 715 kW, 总无功负荷功率为 2 300 kvar, 收敛精度为  $\varepsilon=10^{-4}$ 。感应电动机参数取用文献[10]中的参数, 并将其转换为本文算例基准值下的标么值, 如表 1 所示。将 5 节点原有的节点负荷清零。负荷增长方式为按逐渐增加感应电动机数量的方式增长, 并与按恒功率因数增长模型的连续潮流进行对比。

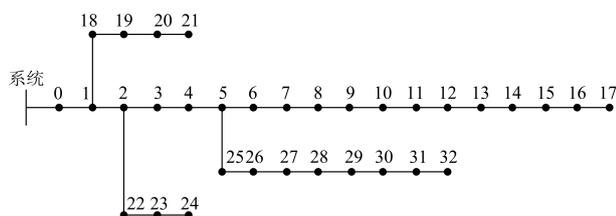


图 5 33 节点配电系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of 33 node distribution system

潮流中仅含一台感应电动机时, 迭代收敛后电动机消耗的有功功率和无功功率为 (0.001 7+j0.001 1), 功率因数为 0.839 5, 将此值作为恒功率因数连续潮流的功率因数。

表 1 感应电动机参数标么值

$R_1$	$X_1$	$R_2$	$X_2$	$X_m$
14.972	47.778	8.611	85.790	1 527.778

1) 两种负荷增长方式的 PV 曲线如图 6 所示, 曲线 1、2、4 是恒功率因数负荷模式下的, 功率因数分别为 0.85、0.839 5、0.75 时对应的 PV 曲线, 曲线 3 表示负荷增长方式为逐渐增加感应电动机数量方式时的 PV 曲线。

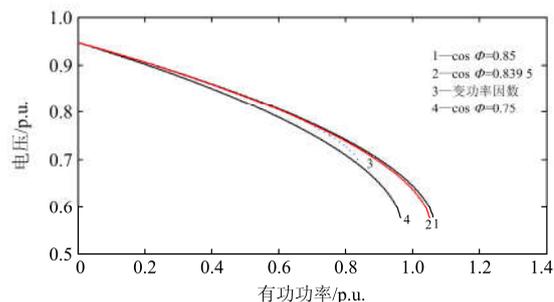


图 6 两种负荷增长方式下的 PV 曲线

Fig. 6 PV curve under two load growth modes

从图 6 可以看出, 当有功功率  $P$  一定时, 功率因数越大, 电压变化率越小, 节点电压值越高; 负荷增长而功率因数不变时, 电压变化率逐渐增大, 节点电压随着负荷增长而降低; 而按逐步增加感应电动机数量的负荷增长方式获得的 PV 曲线的每一点功率因数不同, 这条 PV 曲线与其他 3 条曲线存在交点。

从图 6 和表 2 可以看出, 按逐步增加感应电动机数量方式增长的 PV 曲线电压极限值明显低于按恒功率因数增长的, 这说明感应电动机带泵类负载时的电压稳定性没有恒功率因数负荷乐观。

表 2 两种负荷增长方式下的静稳极限

Table 2 Static stability limit of two kinds of load growth modes

负荷增长方式	极限电压	极限功率
按逐渐增加感应电动机数量的方式	0.687 2	0.844 8+j0.738 9
按恒功率因数(0.839 5)增长的方式	0.567 9	1.052 3+j0.680 9

负荷增长方式为按恒功率因数增长时功率因数不变, 而按逐步增加感应电动机数量方式增长的功率因数是逐渐降低的, 如图 6 所示。感应电动机在额定运行状态下转差率为额定转差率  $s_N$ , 而节点电压降低时, 由图 2 可见, 尽管输出功率有所下降, 但转差率增大, 感应电动机定、转子电流增大, 定、

转子漏抗消耗的无功功率增加很快，感应电动机功率因数降低。电动机负载数量越大，节点电压越低，感应电动机及节点的功率因数越小。因此，感应电动机带泵类负载时系统电压比恒功率因数负荷时更易失稳。

将图 6 局部放大，如图 7 所示。

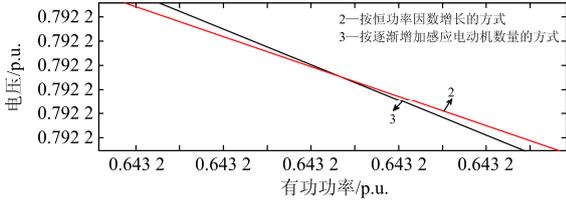


图 7 两条曲线交点

Fig. 7 Intersection of two curves

由图 7 可以看出两条曲线是有交点的，其中交点处电压值为 0.792 2，功率为 0.643 2。这说明，轻载时，按逐步增加感应电动机数量的增长方式的 PV 曲线比按恒功率因数负荷增长方式的 PV 曲线下降速度快，重载时，则反之。

2) 当负荷增长方式为按逐渐增加感应电动机数量的方式时，接入感应电动机的节点电压和无功功率的关系如图 8 所示。由图 8 可以看出，随着节点电压的逐渐降低，无功功率逐渐增加。

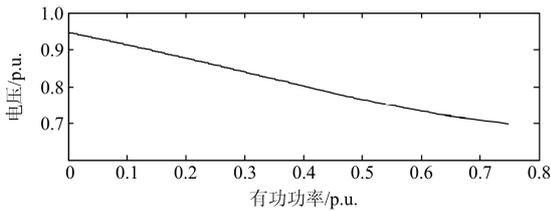


图 8 无功功率随电压变化曲线

Fig. 8 Reactive power with voltage curve

3) 转子电阻对 PV 曲线的影响

将感应电动机转子电阻分别取为 8.611、12.916 5、17.222，即取为原来转子电阻的 1 倍、1.5 倍、2 倍。有功功率随感应电动机数量增加的变化曲线如图 9 所示，电压随电动机数量增加的变化曲线如图 10 所示。从图 9 和图 10 可知，当感应电动机数量一定时，随着转子电阻的增大，感应电动机消耗的有功功率降低，节点电压升高。

这可由感应电动机转子电阻增大情况下的人为机械特性曲线说明。从图 11 可知，转子电阻增大，电动机运行点由曲线 1 的 A 点变为曲线 2 的 B 点，曲线 3、4 是两条恒功率曲线，可见 B 点机械功率、机械转矩都小于 A 点。曲线 5、6 是两条恒转矩曲线，由电机学知识可知，转子电阻增大，定、转子

电流基本不变，即 B<sub>1</sub> 点与 B 点、A 与 A<sub>1</sub> 点的定、转子电流不变。而曲线 6 对应的定、转子电流小于曲线 5，所以，B 与 A 相比，尽管转速下降，转差率升高，但定、转子电流减小，从而有功功率、无功功率都有所下降，节点电压与转子电阻增大前相比有所升高。

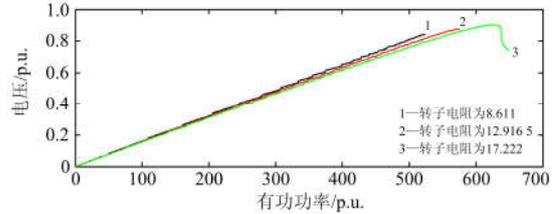


图 9 有功功率随感应电动机台数增加的变化曲线  
Fig. 9 Change curves of active power with the number of induction motors

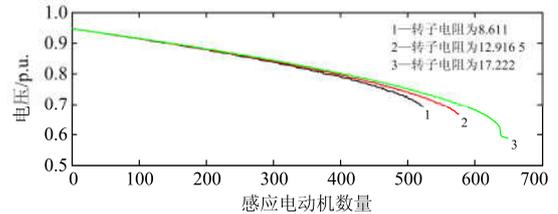


图 10 节点电压随感应电动机台数增加的变化曲线  
Fig. 10 Change curves of the node voltage with the number of induction motors

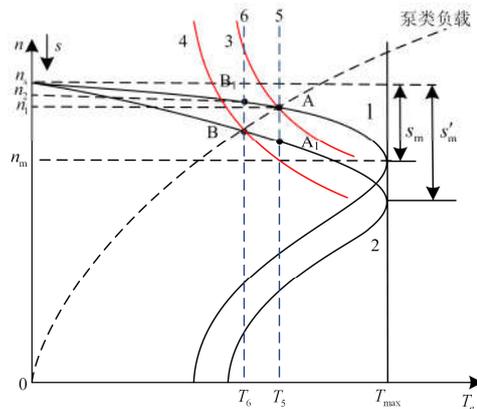


图 11 转子电阻增大时人为机械特性曲线

Fig. 11 Artificial mechanical characteristic curves when rotor resistance increases

## 5 结论

1) 提出了在潮流计算中将感应电动机 T 型等效电路与泵类负载机械特性相结合的负荷建模方式，所建负荷模型更接近物理实际。

2) 提出了感应电动机拖动泵类机械负载时变功率因数的连续潮流方法。该方法对于含大量泵类

机械负载的配电网静态电压稳定性分析更为实用、有效。

3) 感应电动机负荷考虑泵类负载机械特性影响与把负荷等效为恒功率因数负荷相比, 前一情况下配电网电压稳定性较后者低, 但与配电网实际情况更为接近, 因此, 在条件允许前提下采用连续潮流方法分析配电网静态电压稳定性采用本文模型更具有实用价值。

4) 转子电阻增大, 感应电动机数量相同情况下, 节点电压水平更高, 系统静态电压稳定也有所提高。

### 参考文献

- [1] 任杰桢, 鞠平, 赵娟, 等. 考虑电动机负荷的静态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 139-143.  
REN Jiezheng, JU Ping, ZHAO Juan, et al. Static voltage stability analysis considering motor loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 139-143.
- [2] 周雪松, 侯明, 马幼捷, 等. 不同负荷模型在电压稳定分析中的分岔研究[J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(2): 70-72.  
ZHOU Xuesong, HOU Ming, MA Youjie, et al. Bifurcation research about different load model used in voltage stability[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2008, 24(2): 70-72.
- [3] 汤涌, 林伟芳, 孙华东, 等. 考虑负荷变化特性的电压稳定判据分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 12-18.  
TANG Yong, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Analysis of voltage stability criterion considering load characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 12-18.
- [4] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30.  
LI Xinran, HE Renmu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 26-30.
- [5] 杜正春, 周佃民, 董继民. 考虑负荷电压静特性的最佳乘子牛顿潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 102-105.  
DU Zhengchun, ZHOU Dianmin, DONG Jimin. Optimal multiplier Newton method of load flow with static load characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 102-105.
- [6] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.  
ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [7] 朱永强, 刘光晔, 廖庭坚, 等. 计及负荷电压静态特性的电力系统最小负荷裕度的快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 23-28.  
ZHU Yongqiang, LIU Guangye, LIAO Tingjian, et al. Rapid assessment of power system minimum load margin considering load voltage static characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 23-28.
- [8] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian, et al. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [9] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154.  
ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.
- [10] 薛晗光, 刘聪睿, 赵轩, 等. 智能电站工作票移动办理的设计与实现[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 40-43.  
XUE Hanguang, LIU Congrui, ZHAO Xuan, et al. Design and implementation of work order mobile management: practice of intelligent power plant[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 40-43.
- [11] LI S H, CHIANG H D, LIU S. Analysis of composite load models on load margin of voltage stability[C] // 2006 IEEE International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China: 1-7.
- [12] 赵勇. 感应电动机负荷模型的静态特性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 86-92.  
ZHAO Yong. Analysis on static characteristics of induction motor models[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 86-92.
- [13] 马汀山, 茅义军, 何胜, 等. 超超临界二次再热机组给水泵小汽轮机优化选型[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 127-130.  
MA Tingshan, MAO Yijun, HE Sheng, et al. Optimized selection of feedwater pump turbine for ultra-supercritical double-reheat unit[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 127-130.
- [14] 郑欣, 陈文炜, 林舜江, 等. 考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 25-31.  
ZHENG Xin, CHEN Wenwei, LIN Shunjiang, et al.

- Power flow calculation of low voltage distribution network including pump loads[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 25-31.
- [15] 刘慧娟, 范瑜. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [16] 陈白宁, 段智敏. 机电传动控制[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2015.
- [17] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [18] 刘天琪, 邱晓燕, 李华强. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [19] 周杨珺, 高立克, 欧阳健娜. 基于改进微分进化算法的配电网故障定位计算分析方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 56-60.  
ZHOU Yangjun, GAO Like, OUYANG Jianna. Calculation and analysis method for distribution network fault location based on improved differential evolution algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 56-60.
- [20] 孙健, 江道灼, 刘志华. 基于前推回代的配电网潮流改进算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 81-84.  
SUN Jian, JIANG Daozhuo, LIU Zhihua. Modified power flow algorithm of distribution network based on forward/backward sweep method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 81-84.
- [21] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.  
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [22] 刘国威, 孙秋野, 张化光. 配电系统非恒功率负荷潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 22-27.  
LIU Guowei, SUN Qiuye, ZHANG Huaguang. Unconstant power load model flow calculation in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 22-27.
- [23] 林城, 袁峥, 李桂源, 等. 基于系统静态调节特性的故障后潮流计算[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 50-54.  
LIN Cheng, YUAN Zheng, LI Guiyuan. Post-fault power flow calculation based on system static characteristics Unconstant[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 50-54.
- [24] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.  
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [25] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 1-7.  
SUN Huadong, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei. Static voltage stability analysis considering induction motor loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 1-7.
- [26] AMAN M M, JASMON G B, BAKAR A H A, et al. A new approach for optimum simultaneous multi-DG distributed generation units placement and sizing based on maximization of system load ability using HPSO (hybrid particle swarm optimization) algorithm[J]. Energy, 2014, 66(4): 202-215.
- [27] 丁明, 郭学风. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35-40.  
DING Ming, GUO Xuefeng. Three-phase power flow for the weakly meshed distribution network with the distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 35-40.
- [28] 王艳松, 孙桂龙, 曹明志. 基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 30-36.  
WANG Yansong, SUN Guilong, CAO Mingzhi. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 30-36.

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-04-23

作者简介:

初 壮(1973—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行及配电网运行分析; E-mail: chuzhuang@hotmail.com

孙陶然(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网运行分析. E-mail: 1016784411@qq.com

(编辑 周金梅)