

计及频率变化的感应电动机负荷特性分析*

海世芳¹, 司大军², 孙士云¹, 孙德娟¹, 孙应毕¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电网有限责任公司电网规划研究中心, 云南 昆明 650051)

摘要: 对于异步联网系统中网架结构比较薄弱的省网系统或者系统解列后形成的孤岛, 发生故障时会引起比较大的频率波动, 在此情况下对感应电动机进行建模时考虑其频率特性尤为重要。基于感应电动机一阶机械暂态模型, 利用解析法分别推导出不同负载特性下稳态及动态转差率关于系统频率的表达式, 并在此基础上计算吸收的有功功率和无功功率, 进而分析感应电动机的功率-频率特性。在 MATLAB 中建立感应电动机五阶电磁暂态仿真模型, 仿真分析不同负载特性感应电动机的功率-频率特性。仿真结果与理论推导结果吻合, 验证了在简化模型下推导得到的感应电动机频率特性解析式的正确性和有效性。

关键词: 感应电动机; 频率变化; 功频特性; 负荷建模; 仿真模型

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)04-0057-08

Analysis of Load Characteristics of Induction Motor with Frequency Variation*

HAI Shifang¹, SI Dajun², SUN Shiyun¹, SUN Dejuan¹, SUN Yingbi¹

(1. College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Power Grid Planning & Research Center, Kunming 650051, China)

Abstract: A larger frequency fluctuation will be caused when fault occurs in the power systems where the grid structure is relatively weak or isolated islands are formed after system splitting in asynchronous networking system. In this case, it is very important to consider the frequency characteristics of the induction motor when it is modeled. Based on the first order of mechanical transient model of the induction motor, the expression of steady and dynamic state slip ratio of the system frequency under different load characteristics by analytical method was deduced. On this basis, the absorbed active power and reactive power were derived, and then the power-frequency characteristics of the induction motor were analyzed. The fifth-order electromagnetic transient simulation model of induction motor was established in MATLAB simulation software to simulate and analyze the power-frequency characteristics of induction motors with different load characteristics. The simulation result was consistent with the theoretical derivation, so it was correct and effective to deduce the frequency characteristics of an induction motor under the simplified model.

Key words: induction motor; frequency variation; power-frequency characteristics; load modeling; simulation model

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51367009)

作者简介: 海世芳(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定运行。

司大军(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网安全稳定分析、电网规划等。

孙士云(1981—), 女, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护。

0 引言

电力系统负荷特性对电力系统稳定性的计算结果具有重要影响。在仿真分析及选择以此为基础的决策方案时,选择合适的负荷模型尤为重要^[1-4]。一般来说,电力系统中电压的波动比较大,频率的波动则相对来说较小,因此长期以来,电力系统负荷建模的研究大都是以负荷的电压特性为主,并取得了丰富的成果^[5-9]。关于负荷频率特性的研究一直是电力系统研究领域的薄弱环节,在以往电力系统机电暂态仿真中往往不考虑频率的影响。随着我国“一特三大”电力发展战略的实施,对于异步联网系统中网架结构比较薄弱的省网系统或系统解列后形成的孤岛,发生故障或存在特殊的冲击负荷时会引起较大的频率波动,因此有必要考虑频率特性的负荷建模^[10-14]。

感应电动机是电力系统负荷的重要设备,以往文献中主要研究了感应电动机的电压特性,近年来学者们开始意识到负荷频率特性的重要性,并从不同的切入点进行研究分析。文献[15]同时考虑频率特性与电压特性,提出一种改进型综合负荷模型,通过实际电网的数据,证明了该模型的有效性。文献[16]在考虑频率的情况下,提出综合负荷和线性动态两种模型,并将其应用于实际电网,结果表明两种模型的动态响应都接近实测响应,并且在考虑频率时仿真结果的精度更高。文献[17]以 Park 模型为基础,提出一种考虑频率变化的三阶电动机模型。该模型在频率变化较大的情况下,能很好地反映出电动机的动态性能。为了研究电力负荷的频率特性,文献[18]提出考虑频率特性的两种电动机负荷模型:新三阶实用电动机负荷模型和五阶电动机负荷模型。对两种模型考虑频率特性进行仿真对比分析,结果表明五阶电动机负荷模型效果更优。文献[19]在标么值下分析恒机械转矩感应电动机稳态无功功率与频率之间的变化趋势,但未计及暂态过程及感应电动机负载特性的变化。

在以往的研究成果中,更多的是采用动态仿真法观察分析感应电动机的动态响应曲线,以此验证感应电动机考虑频率特性的重要性,但是该方法无助于分析和解释现象发生的原因和影响因素^[20]。本文基于感应电动机的一阶机械暂态模

型,利用解析法理论推导不同负载特性的感应电动机转差率的表达式,进而计算其吸收的功率,通过输入变量频率与输出变量功率的关联关系分析感应电动机的功率频率特性。最后通过仿真算例验证不同负载特性下感应电动机理论推导的正确性。

1 感应电动机频率特性理论分析

1.1 感应电动机数学模型

感应电动机的工作原理如下。首先通过定子绕组的三相电流产生旋转磁场,然后再利用电磁感应原理,在转子绕组内产生感应电动势和感应电流,最后由气隙磁场与转子感应电流相互作用产生电磁转矩,以进行能量转换^[21]。本文采用一阶机械暂态感应电动机模型,等效电路图如图1所示,是一个串并联电路且为复数运算,计算比较复杂,工程计算时可以进行适当简化。励磁回路电抗 x_μ 远大于定子电抗 $x_{s\sigma}$ (即 $x_\mu \gg x_{s\sigma}$),忽略定子和励磁回路电阻等,与变压器相仿将励磁支路移末端点形成近似等效电路,如图2所示。

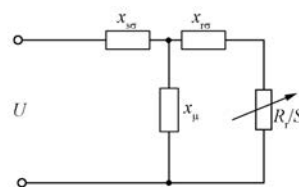


图1 感应电动机 T 形等效电路

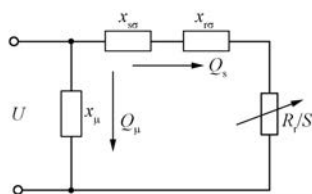


图2 感应电动机 Γ 形等效电路

根据电机学理论基础,利用 Γ 形等效电路可得在外加电源频率恒定的情况下,电动机的有功功率为

$$P_e = I^2 \frac{R_r}{s} = \frac{U^2 R_r s}{R_r^2 + [(x_{r\sigma} + x_{s\sigma})s]^2} \quad (1)$$

式中: I ——回路电流;

R_r ——转子电阻;

s ——转差率;

U ——电源电压;

x_{rg} ——转子电抗;

x_{sg} ——定子电抗。

令 $x_1 = x_{rg} + x_{sg}$, 有 $x_1 = \omega_s L_1$, 其中 ω_s 为定子电角速度; L_1 为定子电感和转子电感之和。

感应电动机稳定运行时, 恒有:

$$T_e = \frac{pP_e}{\omega_s} = T_M \quad (2)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

p ——极对数;

T_M ——机械转矩。

由图 2 电动机 Γ 形等效电路可以看出, 感应电动机的无功功率分为两个部分, 分别是经过简化之后的定、转子回路和励磁回路的无功功率, 即:

$$Q = Q_s + Q_\mu = \frac{U^2 s^2 x_1}{R_r + (x_1 s)^2} + \frac{U^2}{2\pi f_s L_\mu} \quad (3)$$

式中: Q_s ——定子和转子回路的漏磁无功功率;

Q_μ ——励磁回路无功功率;

f_s ——定子侧频率, $f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$;

L_μ ——励磁电感。

转子运动方程为

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_M = \Delta T \quad (4)$$

式中: T_J ——惯性时间常数;

ω_r ——转子电角速度。

1.2 不同负载类型感应电动机的频率特性解析

根据感应电动机系统所带负载的工作特性, 可以将负载分为 3 种: 恒机械转矩、恒机械功率和变机械转矩。分别推导以上 3 种负载特性的感应电动机转差率解析式。以下推导均假定系统电压幅值未发生变化。

1.2.1 恒机械转矩负载特性感应电动机

恒机械转矩负载是指负载对电动机的阻转矩相对电动机转速近似为常数, 例如切削机床、输送机、吊车等。假定机械转矩恒定, 有:

$$T_M = T_{M0} \quad (5)$$

式中: T_{M0} ——初始稳定运行时感应电动机的机械转矩。

将式(5)代入式(2), 并联立式(1), 可得关于转差率的一元二次方程为

$$T_{M0} (2\pi f_s)^3 L_1^2 s^2 - pU^2 R_r s + T_{M0} R_r^2 (2\pi f_s) = 0 \quad (6)$$

解一元二次方程式(6), 当满足条件 $(pU^2 R_r)^2 - 4T_{M0}^2 R_r^2 L_1^2 (2\pi f_s)^2 \geq 0$ 时, 可得关于感应电动机稳态转差率的两个解。

$$s = \frac{pU^2 R_r \pm \sqrt{(pU^2 R_r)^2 - 4T_{M0}^2 R_r^2 L_1^2 (2\pi f_s)^2}}{2T_{M0} L_1^2 (2\pi f_s)^3} \quad (7)$$

当系统发生扰动时, 电磁转矩与机械转矩会经历一个复杂的相互影响和作用的过程, 进而达到新的平衡。考虑转子运动过程分析频率变化时感应电动机的暂态特性, 并考虑简化条件 $R_r \gg x_1 s$, 联立电磁转矩式(2)和机械转矩式(5), 并代入转子运动方程式(4), 可得:

$$\frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{pU^2}{T_J R_r \omega_s^2} \right) \omega_r = \frac{pU^2}{T_J R_r \omega_s} - \frac{T_{M0}}{T_J} \quad (8)$$

求解式(8), 可得转子电角速度 ω_r 的表达式:

$$\omega_r = C e^{-\left(\frac{pU^2}{T_J R_r \omega_s^2}\right)t} + \omega_s - \frac{T_{M0} R_r \omega_s^2}{pU^2} \quad (9)$$

其中: C 为常数, 其数值根据系统不同程度的扰动来确定, 可按照式(10)计算。

$$C = - \left[2\pi f_s - \omega_{r0} - \frac{T_{M0} R_r (2\pi f_s)^2}{pU^2} \right] \quad (10)$$

式中: ω_{r0} ——初始转子电角速度。

考虑转差率 s 、转子电角速度 ω_r 和定子电角速度 ω_s 的关系:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (11)$$

可得暂态过程中转差率 s 的表达式为

$$s = - \frac{C}{2\pi f_s} e^{-\frac{pU^2 t}{T_J R_r (2\pi f_s)^2}} + \frac{T_{M0} R_r 2\pi f_s}{pU^2} \quad (12)$$

1.2.2 恒机械功率负载特性感应电动机

恒机械功率负载是指在调节转速的过程中所需功率不变的负载, 负载特性为负载转矩与转速成反比, 例如机床主轴和轧机、造纸机、塑料薄膜生产线中的卷取机和开卷机等。假定机械功率恒定, 有:

$$T_M = \frac{pP_{M0}}{\omega_r} \quad (13)$$

式中: P_{M0} ——恒定机械功率。

将式(13)代入式(2),并联立式(1),当 $(-U^2 R_r)^2 - 4(U^2 R_r + P_{M0} x_1^2) P_{M0} R_r^2 \geq 0$ 时,解得感应电动机运行在恒机械功率情况下的稳态转差率为

$$s = \frac{U^2 R_r \pm R_r \sqrt{U^4 - 4P_{M0}^2 (2\pi f_s L_1)^2 - 4P_{M0} U^2 R_r}}{2[P_{M0} (2\pi f_s L_1)^2 + U^2 R_r]} \quad (14)$$

联立电磁转矩式(2)和机械转矩式(13),并代入转子运动方程式(4),可得到微分方程式为

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{pU^2(\omega_s - \omega_r)}{T_j R_r \omega_s^2} - \frac{pP_{M0}}{T_j \omega_r} \quad (15)$$

式(15)中求取转子电角度 ω_r 时无法分离变量,不能进而得到动态过程中转差率关于频率的解析式。

1.2.3 变机械转矩负载特性感应电动机

变机械转矩负载的机械特性具有共同的特

$$s_a = -\frac{b}{3a} + \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 6abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (18)$$

$$s_b = -\frac{b}{3a} + \left(\frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 6abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \left(\frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (19)$$

$$s_c = -\frac{b}{3a} + \left(\frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{1}{3\sqrt[3]{2a}} \sqrt[3]{-2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 6abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}} - \left(\frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}\right) \frac{\sqrt[3]{2}(3ac - b^2)}{3a} \frac{1}{\sqrt[3]{2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{(-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2 + 4(3ac - b^2)^3}}} \quad (20)$$

联立式(2)及式(16),并代入式(4),可得微分方程为

$$\frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{pU^2}{T_j R_r \omega_s^2} + \frac{\beta_0}{T_j}\right) \omega_r = \frac{pU^2}{T_j R_r \omega_s} - \frac{T_{M0}}{T_j} + \frac{\beta_0 \omega_{r0}}{T_j} \quad (21)$$

求解式(21),可得转子电角速度 ω_r 的表达式为

$$\omega_r = Ce^{-\left(\frac{pU^2}{T_j R_r \omega_s^2} + \frac{\beta_0}{T_j}\right)t} + \frac{(pU^2 - T_{M0} R_r \omega_s + \beta_0 \omega_{r0} R_r \omega_s) \omega_s}{pU^2 + \beta_0 R_r \omega_s} \quad (22)$$

与恒机械转矩感应电动机相同,考虑转差率、转子电角速度和定子电角速度的关系,可得变机械转矩的感应电动机在暂态过程中的转差率表达式为

$$s = -\frac{C}{(2\pi f_s)} e^{-\left[\frac{pU^2 + \beta_0 R_r (2\pi f_s)^2}{T_j R_r (2\pi f_s)^2}\right]t} - \frac{pU^2 - T_{M0} R_r (2\pi f_s) + \beta_0 \omega_{r0} R_r (2\pi f_s)}{pU^2 + \beta_0 R_r (2\pi f_s)^2} + 1 \quad (23)$$

征,即转速的大小变化,将影响感应电动机机械转矩的变化。假定机械转矩的表达式为

$$T_M = T_{M0} + \beta_0(\omega_r - \omega_{r0}) \quad (16)$$

式中: β_0 ——转矩系数。

将式(16)代入式(2),并联立式(1),可得关于转差率的一元三次方程:

$$as^3 + bs^2 + cs + d = 0 \quad (17)$$

其中: $a = -(2\pi f_s)^4 \beta_0 L_1^2$;

$b = T_{M0} L_1^2 (2\pi f_s)^3 + \beta_0 L_1^2 (2\pi f_s)^4 - \beta_0 \omega_{r0} L_1^2 (2\pi f_s)^3$;

$c = -[\beta_0 R_r^2 (2\pi f_s)^2 + pU^2 R_r]$;

$d = T_{M0} R_r^2 (2\pi f_s) + \beta_0 R_r^2 (2\pi f_s)^2 - \beta_0 R_r^2 \omega_{r0} (2\pi f_s)$ 。

求解式(17),可得关于变机械转矩感应电动机转差率的3个解(s_a 、 s_b 、 s_c)的解析式分别为

其中,常数 C 可按照式 (24) 计算:

$$C = - \left[- \omega_{r0} + \frac{pU^2(2\pi f_s) - T_{M0}R_r(2\pi f_s)^2 + \beta_0\omega_{r0}R_r(2\pi f_s)^2}{pU^2 + \beta_0R_r(2\pi f_s)^2} \right] \tag{24}$$

感应电机作为电动机使用时,其转差率 s 的取值范围为 $0 < s < 1$,额定运行时常取 $0.01 < s < 0.05$ 。因此需要根据实际电力系统运行情况选择合适的符号,舍去表达式中不满足条件的解。

1.3 不同负载类型感应电动机的频率特性分析

以某三相四极感应电动机为例,参数设置如表 1 所示^[22]。考虑 3 种不同负载特性计算频率发生变化全过程中稳态、暂态转差率的表达式,并根据合理的取值范围确定其表达式的符号,进而可得频率扰动过程中有功功率和无功功率的表达式。

表 1 感应电动机运行参数	
参数名称	参数值
T_J	2
L_μ/H	0.088
R_r/Ω	0.349
U/V	380
$T_{M0}/(\text{N}\cdot\text{m})$	100
P_{M0}/W	15 000
β_0	3
f_s/Hz	50
L_1/H	0.007 248
$\omega_{r0}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	301.251 6

根据上述表达式,绘制出系统频率变化时,3 种负载类型感应电动机稳态机械转矩、稳态转差率、稳态有功功率、稳态漏磁无功功率、稳态励磁无功功率及总的稳态无功功率变化趋势图,如图 3 所示。

感应电动机吸收功率的变化情况很大程度上取决于机械负载的转矩特性。由图 3 可知,随着频率的增加,恒机械转矩负载特性的感应电动机稳态转差率、稳态有功功率、稳态漏磁无功功率增大;稳态励磁无功功率减小,总的无功功率为两者之和,总体趋势增大。恒机械功率负载特性的感应电动机随频率的增加,机械转矩减小;稳态转差率几乎不变;其负载特性决定了定子侧频率波动时电动机所吸收的有功功率和总的无功功率不变;稳态漏磁无功功率随频率的增加而增加,稳态励磁无功功率则减小。变机械转矩负载特性的感应电动机随频率的增加,机械转矩、稳态转差率、稳态有功功率、稳态漏磁无功功率增大;稳态励磁无功功率减小;总的稳态无功功率增大。3 种负载特性的感应电动机吸收的稳态励磁无功功率均随着频率的增加而减小,变化趋势一致,且曲线重合。

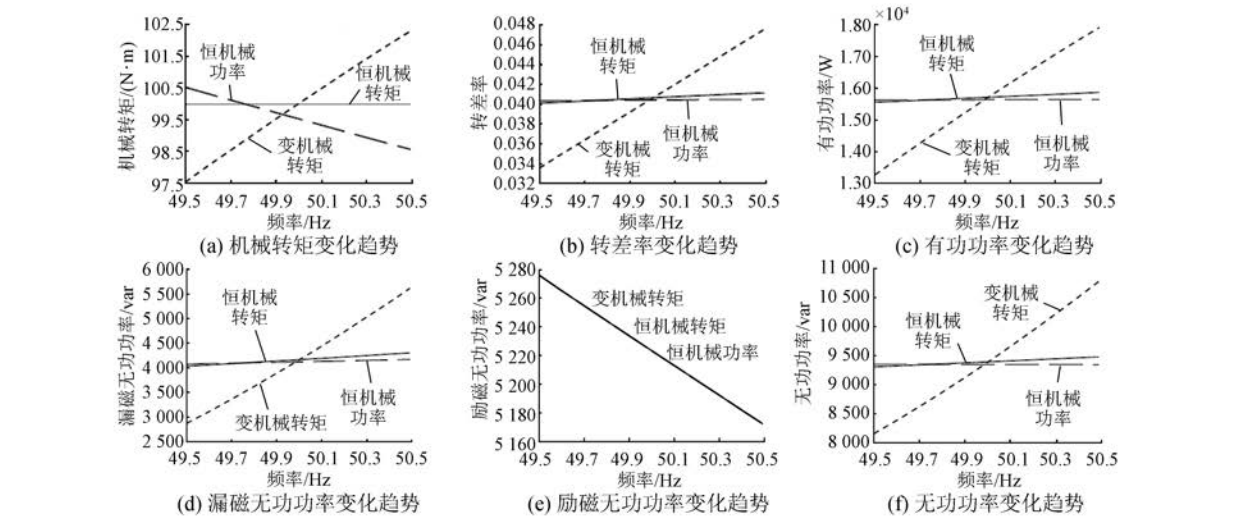


图 3 感应电动机稳态频率特性

考虑转子运动过程,以频率发生阶跃变化为例,如图 4 所示。0 s 时系统频率为 50.0 Hz,2 s

时频率增加至 50.5 Hz, 4 s 时扰动消失, 频率恢复至 50 Hz。扰动全过程中不同负载类型感应电动机的机械转矩、电磁转矩、转差率、有功功率及总的无功功率变化趋势如图 5 所示。因为无法得到恒机械功率负载特性感应电动机考虑转子运动过程的解析式, 所以图 5 只对比恒机械转矩和变机械转矩特性感应电动机频率特性。

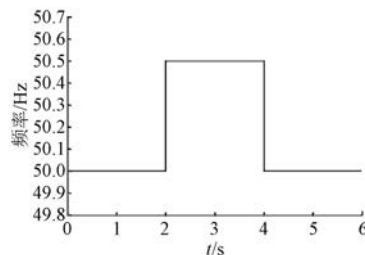


图4 频率阶跃变化趋势

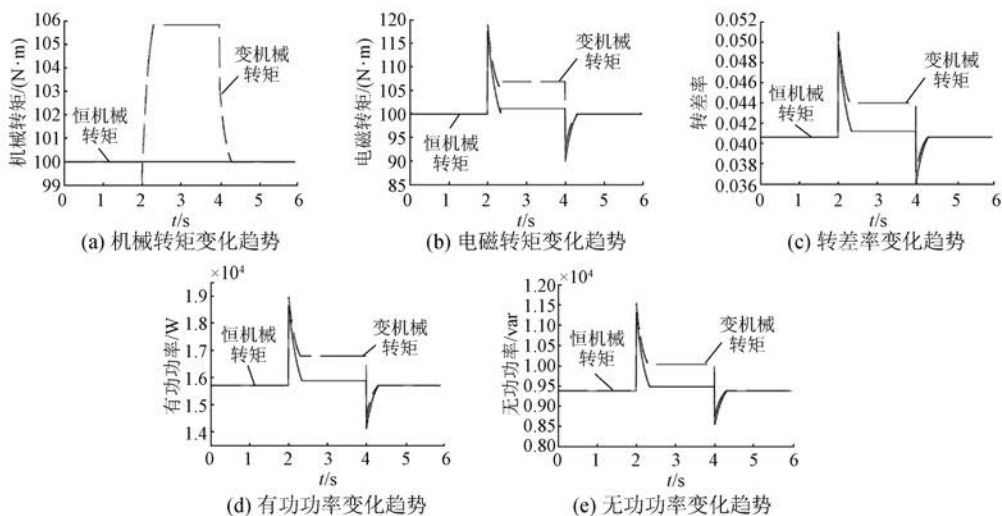


图5 感应电动机暂态全过程频率特性

恒机械转矩负载特性的感应电动机在系统频率上升的瞬间, 定子电角速度 ω_s 突变, 而转子电角速度 ω_r 在扰动瞬间不会突变; 结合式 (11) 可知, 感应电动机转差率在该瞬间增大; 由式 (12) 可知, 之后转差率呈指数衰减至新的稳态。电动机达到新的稳定运行状态后, 对式 (11) 求导并进行简单变换后可知, 若满足条件 $\omega_r \Delta \omega_s > \omega_s \Delta \omega_r$, 则感应电动机稳态转差率随着系统频率的增大而增大。恒机械转矩负载特性感应电动机在扰动期间机械转矩恒定, 稳态电磁转矩也不会发生变化, 由式 (2) 可知在系统频率增大时, 感应电动机吸收的稳态有功功率增加; 对式 (3) 第一项求导并进行简单变换后可知, 若满足条件 $2U^2 L_1 R_r^2 s \omega_s + U^2 L_1 R_r^2 s^2 - U^2 L_1^3 s^4 \omega_s^2 > 0$, 则感应电动机稳态漏磁无功功率随着系统频率的增大而增大; 由式 (3) 第 2 项可知稳态励磁无功功率与频率成反比, 所以当系统频率增大时, 稳态励磁无功功率减小。感应电动机吸收的总的稳态无功功率为漏磁无功功率与励磁无功功率之和, 当稳态漏磁无功功率占主

导时, 总的稳态无功功率随频率的增大而增大; 当稳态励磁无功功率占主导时, 总的稳态无功功率随频率的增大而减小。

对于恒机械功率负载特性的感应电动机, ω_r 的变化取决于电磁转矩和机械转矩的差, 在频率上升时若式 (4) 中的 $\Delta T > 0$, 则 ω_r 对应增大。由式 (13) 可知, 当机械功率不变, ω_r 增大时, 机械转矩减小; 由恒机械功率负载特性可知, 发生频率波动时, 感应电动机吸收的稳态有功功率和稳态无功功率不变; 在此过程中, 稳态转差率几乎不变。

变机械转矩负载特性的感应电动机频率上升时有 $\Delta T > 0$, ω_r 对应增大, 由式 (16) 可知 ω_r 增大时, 机械转矩增大, 进而由式 (2) 可知系统频率增大时稳态电磁转矩也增大, 故吸收的稳态有功功率增加; 变机械转矩负载特性感应电动机的稳态转差率与稳态无功功率的变化分析与恒机械转矩负载特性的感应电动机一致。3 种负载特性感应电动机频率下降时转差率、有功功率和无功功率等变化趋势与频率上升时变化趋势相反。

2 感应电动机频率特性仿真分析

建立恒机械转矩负载特性感应电动机仿真模型

型如图 6 所示。主要由可编程电压源、三相双绕组变压器、感应电动机及测量环节组成。感应电动机参数设置如表 1 所示。

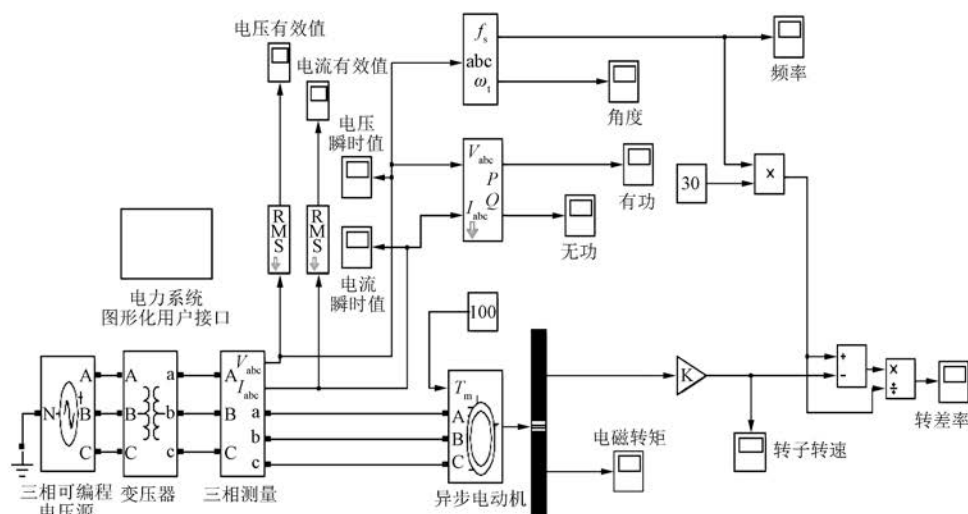


图 6 恒机械转矩负载特性感应电动机仿真模型

系统频率按图 4 变化,机械转矩、转差率、有功功率和无功功率的变化趋势如图 7 所示。

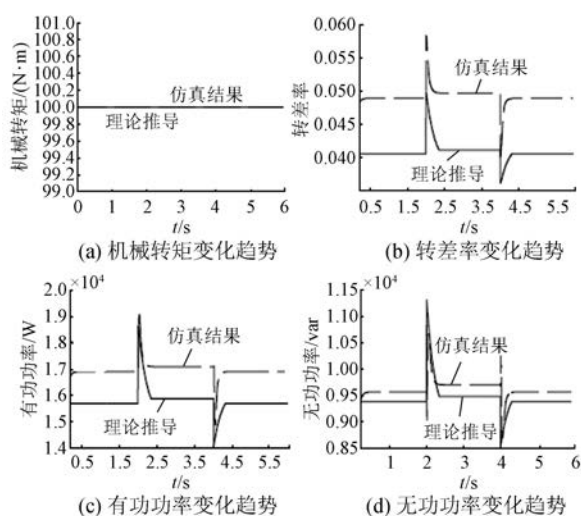


图 7 恒机械转矩特性感应电动机频率特性

机械转矩按照式(16)变化时,系统频率引起的机械转矩、转差率、有功功率和无功功率变化情况如图 8 所示。

恒机械转矩负载特性感应电动机的机械转矩恒为 $100 \text{ N} \cdot \text{m}$,理论推导与仿真结果曲线重合。将式(22)代入式(16)分析可知:频率上升瞬间,变机械转矩负载特性感应电动机的机械转矩呈指

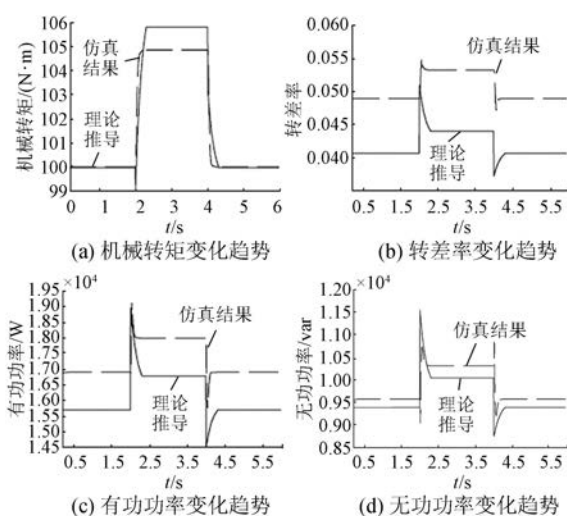


图 8 变机械转矩特性感应电动机频率特性

数变化趋势增大至新的稳定运行状态,频率下降瞬间,机械转矩呈指数变化趋势减小至新的稳定运行状态。

频率上升瞬间,两种负载特性的感应电动机转差率、有功功率和无功功率均瞬间增大,然后呈指数变化趋势衰减至新的稳定运行状态;频率扰动消失瞬间,转差率、有功功率和无功功率瞬间减小,然后呈指数变化趋势恢复至新的稳定运行状态。因无法得到恒机械功率负载特性感应电动机

考虑转子运动过程的解析式,故只分析了恒机械转矩和变机械转矩特性的感应电动机理论计算与仿真结果对比变化趋势。

从图 7 和图 8 可以看出,通过 MATLAB 建立不同负载特性的感应电动机五阶电磁暂态模型,仿真分析其功率-频率特性的结果与理论计算结果存在一定的误差,原因在于在理论推导时采用简化 Γ 形等效电路。理论推导结果与仿真结果变化趋势一致,验证了在简化模型下推导所得感应电动机频率特性解析式的正确性和有效性。

3 结 语

本文基于一阶机械暂态感应电动机模型,分别推导出系统侧频率波动时感应电动机的机械转矩、转差率、有功功率和无功功率的解析式,进而分析得到负载特性感应电动机的频率特性。

(1) 恒机械转矩负载特性感应电动机的机械转矩与频率无关,不随系统频率的变化而变化;转差率、有功功率及总的无功功率随频率的增大而增大。

(2) 恒机械功率负载特性感应电动机在系统频率增大时,机械转矩减小,转差率不变,所吸收的有功功率和无功功率也不变。

(3) 变机械转矩负载特性感应电动机在系统频率增大时,机械转矩、转差率、有功功率和无功功率均呈现增大趋势。

【参考文献】

- [1] 鞠平,谢会玲,陈谦.电力负荷建模研究的发展趋势[J].电力系统自动化,2007,31(2): 1.
- [2] 李海峰,郑静媛,徐永海.暂态稳定分析中低压切负荷对仿真结果的影响[J].中国电力,2012,45(3): 28.
- [3] 朱建全,刘锋,梅生伟,等.基于证据推理的电力负荷建模[J].电工技术学报,2015,30(15): 89.
- [4] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等.负荷建模的基本原则和方法[J].电网技术,2007,31(4): 1.
- [5] PERERIRA L, KOSTEREV D, MACKINP, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC[J].IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(4): 1108.
- [6] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等.考虑配电网的综合负荷模型[J].电网技术,2007,31(5): 34.
- [7] 杨华春,贺仁睦,王鹏,等.基于聚合理论的大区电网负荷建模[J].电力系统自动化,2005,29(1): 49.
- [8] 姜惠兰,钱广超,范中林,等.考虑负荷控制的有源配电网故障恢复策略[J].中国电力,2017,50(3): 101.
- [9] 唐永红,郑晓雨,马进.实际电网中提高负荷模型实用性的方法[J].电网技术,2010,34(7): 47.
- [10] 陈谦,汤涌,鞠平,等.计及配电网阻抗和无功补偿的完整综合负荷模型的参数辨识[J].中国电机工程学报,2010,30(22): 44.
- [11] XU X, MATHUR R M, JIANG J, et al. Modeling effects of system frequency variations in induction motor dynamics using singular perturbations[J].IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(2): 764.
- [12] 屈克庆,李文旗,赵晋斌,等.孤岛微网不平衡负荷下控制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(11): 8.
- [13] 鞠平,马大强.电力负荷的动静特性对低频振荡阻尼的影响分析[J].浙江大学学报(自然科学版),1989,23(5): 127.
- [14] 杨博,解大,陈陈,等.电力系统低频减载的现状和应用[J].华东电力,2002,30(9): 14.
- [15] 贺仁睦,叶静,徐欢,等.计及频率特性的实测负荷建模[J].电工技术学报,2011,26(5): 165.
- [16] 张孝,鞠平,陈谦,等.考虑频率特性的负荷模型研究及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(3): 353.
- [17] 蔡昌春,鞠平,张建勇.计及频率变化的感应电动机实用模型[J].高电压技术,2012,38(3): 743.
- [18] 梁伟,鞠平,余一平.考虑频率特性的感应电动机负荷模型的对比研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(9): 132.
- [19] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].2版.北京:中国电力出版社,2008.
- [20] 廖卫平.感应电动机负荷参数辨识及动态特性解析算法研究[D].广州:广东工业大学,2016.
- [21] 胡虔生,胡敏强.电机学[M].2版.中国电力出版社,2009.
- [22] 王晶,翁国庆.电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.

收稿日期: 2018-10-22