

电压跌落时感应电动机反馈电流计算及转速影响研究

姜杰¹, 许宏¹, 陈贵文², 张太勤³

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400040; 2. 黑龙江省水利厅水电局, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400030)

摘要: 大容量感应电动机会影响工业配网的短路电流水平, 准确计算其反馈电流对系统保护配置及全网短路电流计算具有重要作用。电压跌落时电动机转速变化会影响电动机的反馈电流, 不考虑转速变化可能会导致反馈电流计算结果不准确, 影响保护的正确动作。利用感应电动机静态等值电路和复常系数线性微分方程组解法求解定转子磁链正负序强制分量和自由分量, 进而得到电压跌落时计及转速变化的感应电动机反馈电流计算方法, 并进一步探讨了转速对磁链和反馈电流各分量的影响。采用 PSCAD/ EMTDC 仿真软件中感应电动机的 5 阶动态模型仿真验证了该分析的正确性。

关键词: 鼠笼式感应电动机; 状态方程; 反馈电流; 转速; 配电网

Induction motor feedback current calculation and speed factor analysis

JIANG Jie¹, XU Hong¹, CHEN Gui-wen², ZHANG Tai-qin³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400040, China; 2. Heilongjiang Water Resources Department Hydroelectric Bureau, Harbin 150040, China; 3. Chongqing New Century Electrical Co., Ltd., Chongqing 400030, China)

Abstract: Large capacity induction machines have a great influence on short-circuit current level of industrial distribution network. Accurate calculation of the feedback current plays an important role in protection configuration and short-circuit current calculation. The motor speed changing during voltage drop is an important factor affecting the accuracy of feedback current calculation, regardless of the speed changing may cause error in feedback current calculation and affect the operation of protection. Using the positive and negative sequence steady-state equivalent circuit of induction motor and constant complex coefficient linear differential equations solving process, forced component and free component of stator/rotor flux linkage are solved. Then the induction motor feedback current formula in consideration of speed changing factor is deduced. Furthermore, the influence of speed on each component of the flux and feedback current is analyzed. The correctness of the proposed analysis is verified by the fifth electromagnetic transient model of induction motor in PSCAD/EMTDC simulation software.

Key words: squirrel-cage rotor induction motor; equation of state; feedback current; speed; distribution network

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0031-07

0 引言

感应电动机被广泛应用于工业生产活动, 并且电动机设计与应用逐渐向大型化发展^[1-3]。系统发生短路时, 感应电动机向短路点提供大量的反馈电流, 对短路电流计算结果影响很大^[4-5]。相比商业配网或民用配网而言, 大容量工业电动机一般接入 6/10 kV 母线, 电动机容量大等值阻抗较小, 反馈电流周期分量初始值较大并且交流衰减分量衰减慢。在计算工业配网短路电流水平时应计及这部分感应电动机反馈电流的影响^[6]。感应电动机的短路反馈

电流计算一般采用电压源等值计算方法^[6-7], 没有计及感应电动机的电磁暂态特性, 难以保证计算精度。目前有大量文献对风力发电机短路电流进行研究^[8-9], 但是感应电动机暂态特性与风力发电机存在差异。因此需要深入研究电压跌落时感应电动机的动态特性。

对感应电动机反馈电流的研究已有较多的成果。时域仿真^[10-11]、物理模拟^[12]是得到感应电动机反馈电流的基本方法。文献[12-13]综合现有文献, 总结了常用的感应电动机反馈电流计算公式以及商业软件中使用的感应电动机反馈电流计算公式, 并

通过物理试验发现现有反馈电流计算方法计算精度存在差异；文献[10]进一步推导了电动机群的反馈电流计算方法，并通过动态仿真进行验证。文献[14-15]根据现有电动机反馈电流计算公式，讨论了负载率、电动机容量及电压跌落幅值等因素对反馈电流的影响；文献[16]讨论了饱和效应对电动机反馈电流的计算精度的影响，指出计算感应电动机反馈电流应考虑饱和效应的影响。前述研究深入探讨了电源参数、电机参数等多方面因素对反馈电流计算精度的影响，但是并未考虑转速对感应电动机反馈电流的影响。文献[9]给出了电压跌落时计及感应电机反馈电流的系统短路电流序分量计算方法，由于未计及电压跌落时转差变化其反馈电流稳态值计算误差较大。

鉴于此，本文基于感应电机空间矢量模型提出计及转速变化的感应电动机反馈电流计算方法，该方法可用于计算对称及不对称电压跌落时感应电动机反馈电流。在此基础上，进一步分析了转速变化对反馈电流各个分量的影响。通过 PSCAD/ EMTDC 软件，采用 5 阶感应电动机模型的动态仿真验证本文研究结论的正确性。

1 感应电动机空间矢量模型

忽略磁饱和现象，定转子均采用电动机惯例，定子参考坐标系下感应电动机的 5 阶空间矢量模型的电压方程和磁链方程^[17]分别为

$$\mathbf{u}_s(t) = R_s \mathbf{i}_s(t) + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_r(t) = R_r \mathbf{i}_r(t) + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r(t)}{dt} - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r(t) \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s(t) = L_s \mathbf{i}_s(t) + L_m \mathbf{i}_r(t) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r(t) = L_r \mathbf{i}_r(t) + L_m \mathbf{i}_s(t) \quad (4)$$

式中： $\mathbf{u}_s(t)$ 、 $\mathbf{u}_r(t)$ 和 $\mathbf{i}_s(t)$ 、 $\mathbf{i}_r(t)$ 分别为定转子电压和定转子电流的空间矢量； $\boldsymbol{\psi}_s(t)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r(t)$ 为定子和转子磁链的空间矢量，以上空间矢量均为瞬时空间矢量； R_s 、 R_r 分别为定子电阻和转子电阻； L_s 、 L_r 分别为定子和转子的自电感， L_m 为励磁电感， $L_s = L_{ls} + L_m$ ， $L_r = L_{lr} + L_m$ ， L_{ls} 是定子漏电感， L_{lr} 是转子漏电感； ω_r 为转子转速， $\omega_r = (1-s)\omega_s$ ， s 为转差率。

将式(3)代入式(4)得

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s = \frac{L_r \boldsymbol{\psi}_s - L_m \boldsymbol{\psi}_r}{L_s L_r - L_m^2} \\ \mathbf{i}_r = \frac{L_s \boldsymbol{\psi}_r - L_m \boldsymbol{\psi}_s}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases} \quad (5)$$

可见，定转子磁链已知的条件下定子电流可以

用定转子磁链表示。

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2)并消去变量 $\mathbf{i}_s(t)$ 、 $\mathbf{i}_r(t)$ 可得

$$\begin{bmatrix} \frac{d\boldsymbol{\psi}_s(t)}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\psi}_r(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} & \frac{R_s L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ \frac{R_r L_m}{L_s L_r - L_m^2} & j\omega_r - \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_m^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_s(t) \\ \boldsymbol{\psi}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ \mathbf{u}_r(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)是以定转子磁链 $\boldsymbol{\psi}_s(t)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r(t)$ 为状态变量的感应电动机状态方程组。该方程组为二阶复常系数线性微分方程组，定转子磁链 $\boldsymbol{\psi}_s(t)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r(t)$ 的解包括自由分量和强制分量两个部分。

把式(6)简写为二阶复常系数微分方程标准形式，如式(7)。

$$\begin{bmatrix} \frac{d\boldsymbol{\psi}_s(t)}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\psi}_r(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_s(t) \\ \boldsymbol{\psi}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ \mathbf{u}_r(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

2 感应电动机反馈电流表达式

2.1 强制分量的求解

电压跌落前后电动机端电压的空间矢量分别为

$$\mathbf{u}_s(t) = \begin{cases} \mathbf{u}_{s,\text{pre}}(t) & t < 0 \\ \mathbf{u}_{\text{sf},1}(t) + \mathbf{u}_{\text{sf},2}(t) & t \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\mathbf{u}_{s,\text{pre}}(t)$ 是电压跌落前定子电压的空间矢量； $\mathbf{u}_{\text{sf},1}(t)$ 、 $\mathbf{u}_{\text{sf},2}(t)$ 分别为电压跌落后电压空间矢量正负序分量。发生对称电压跌落时端电压只含有正序分量。

定转子磁链强制分量为电压跌落后的稳态响应，可基于感应电动机正序^[18]和负序静态等值电路(图 1)计算。发生电压跌落时，定子电流正负序空间矢量 $\mathbf{i}_{\text{sf},1}$ 、 $\mathbf{i}_{\text{sf},2}$ 和端电压正负序空间矢量 $\mathbf{u}_{\text{sf},1}$ 、 $\mathbf{u}_{\text{sf},2}$ 的关系为

$$\mathbf{i}_{\text{sf},1} = \frac{\mathbf{u}_{\text{sf},1}}{Z_{s1}}; \quad \mathbf{i}_{\text{sf},2} = \frac{\mathbf{u}_{\text{sf},2}}{Z_{s2}} \quad (9)$$

式中， Z_{s1} 、 Z_{s2} 分别为感应电动机等效正序阻抗和等效负序阻抗， $Z_{s1} = R_s + j\omega_s L_{ls} + (j\omega_s L_m) // (R_r / s + j\omega_s L_{lr})$ ， $Z_{s2} = R_s - j\omega_s L_{ls} + (-j\omega_s L_m) // (R_r / (2-s) - j\omega_s L_{lr})$ ，其中“//”表示两侧阻抗并联。 Z_{s1} 、 Z_{s2} 均为包含转差率 s 的表达式。

$\mathbf{i}_{\text{rf},1}$ 、 $\mathbf{i}_{\text{rf},2}$ 分别为 $\mathbf{i}_{\text{sf},1}$ 、 $\mathbf{i}_{\text{sf},2}$ 在转子支路的分流。转子电流正负序空间矢量 $\mathbf{i}_{\text{rf},1}$ 、 $\mathbf{i}_{\text{rf},2}$ 和端电压正负序空间矢量 $\mathbf{u}_{\text{sf},1}$ 、 $\mathbf{u}_{\text{sf},2}$ 的关系为

$$\mathbf{i}_{\text{rf},1} = \frac{-j\omega_s L_m}{\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r\right) Z_{s1}} \mathbf{u}_{\text{sf},1}(t) = \frac{\mathbf{u}_{\text{sf},1}(t)}{Z_{r1}} \quad (10)$$

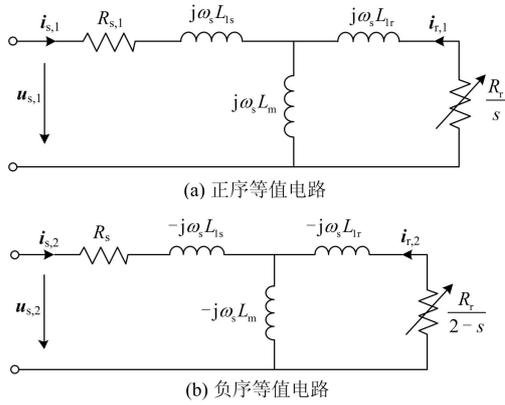


图1 感应电动机正负序静态等值电路

Fig. 1 Positive and negative sequence steady-state equivalent circuits of an IM

$$\mathbf{i}_{rf,2} = \frac{j\omega_s L_m}{\left(\frac{R_r}{s-2} - j\omega_s L_r\right) Z_{s2}} \mathbf{u}_{sf,2}(t) = \frac{\mathbf{u}_{sf,2}(t)}{Z_{r2}} \quad (11)$$

式中, Z_{r1} 、 Z_{r2} 分别是转子电流正负序空间矢量与电动机端电压正负序空间矢量间的等效阻抗并且均为包含转差率 s 的表达式。把式(9)~式(11)代入式(3)、式(4)得

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_{sf}(t) &= L_s \mathbf{i}_{sf}(t) + L_m \mathbf{i}_{rf}(t) = \\ & \left(\frac{L_s}{Z_{s1}} + \frac{L_m}{Z_{r1}} \right) \mathbf{u}_{sf,1}(t) + \left(\frac{L_s}{Z_{s2}} + \frac{L_m}{Z_{r2}} \right) \mathbf{u}_{sf,2}(t) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_{rf}(t) &= L_m \mathbf{i}_{sf}(t) + L_r \mathbf{i}_{rf}(t) = \\ & \left(\frac{L_m}{Z_{s1}} + \frac{L_r}{Z_{r1}} \right) \mathbf{u}_{sf,1}(t) + \left(\frac{L_m}{Z_{s2}} + \frac{L_r}{Z_{r2}} \right) \mathbf{u}_{sf,2}(t) \quad (13) \end{aligned}$$

2.2 自由分量的求解

电动机的状态方程自由分量解法采用文献[19]方法求解。定转子磁链的自由分量 $\boldsymbol{\psi}_{sn}(t)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_m(t)$ 可以表示为

$$\boldsymbol{\psi}_{sn}(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\psi}_m(t) = \frac{\lambda_1 - a}{b} c_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_2 - a}{b} c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (15)$$

式中: λ_1 、 λ_2 是电动机状态方程组的特征值, 由电动机参数和转差率 s 决定; c_1 、 c_2 为待定系数, 决定于电压跌落前后电压矢量。电压跌落瞬间电动机磁链守恒, c_1 、 c_2 分别满足

$$c_1 = -\frac{\lambda_2 - a}{\lambda_1 - \lambda_2} [\boldsymbol{\psi}_{s,pre}(0) - \boldsymbol{\psi}_{sf}(0)] + \frac{b}{\lambda_1 - \lambda_2} [\boldsymbol{\psi}_{r,pre}(0) - \boldsymbol{\psi}_{rf}(0)] \quad (16)$$

$$c_2 = \frac{\lambda_1 - a}{\lambda_1 - \lambda_2} [\boldsymbol{\psi}_{s,pre}(0) - \boldsymbol{\psi}_{sf}(0)] - \frac{b}{\lambda_1 - \lambda_2} [\boldsymbol{\psi}_{r,pre}(0) - \boldsymbol{\psi}_{rf}(0)] \quad (17)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}_{s,pre}(0)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{r,pre}(0)$ 是电压跌落前定转子磁链矢量; $\boldsymbol{\psi}_{sf}(0)$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{rf}(0)$ 是电压跌落时定转子磁链矢量强制分量。

将式(12)~式(15)代入式(5), 得定子电流空间矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s(t) &= (L_r \boldsymbol{\psi}_s(t) - L_m \boldsymbol{\psi}_r(t)) / (L_s L_r - L_m^2) = \\ & \frac{\mathbf{u}_{sf,1}(t)}{Z_{s1}} + \frac{\mathbf{u}_{sf,2}(t)}{Z_{s2}} + \frac{c_1 \left(L_r - \frac{\lambda_1 - a}{b} L_m \right)}{L_s L_r - L_m^2} e^{\lambda_1 t} + \quad (18) \\ & \frac{c_2 \left(L_r - \frac{\lambda_2 - a}{b} L_m \right)}{L_s L_r - L_m^2} e^{\lambda_2 t} \end{aligned}$$

可见感应电动机反馈电流由同步频率 ω_s 的稳态正负序交流分量、转速频率 ω_r 交流衰减分量和直流衰减分量四个部分组成。稳态正负序交流分量是由电动机端电压产生。直流衰减分量是由于电压跌落瞬间电动机定转子磁链保持不变, 定转子上分别产生以定转子时间常数 τ_s 、 τ_r 衰减的直流衰减电流。转速频率衰减分量是由转子直流衰减电流在定子绕组中感应产生的。由于中压配电网中一般采用中性点不接地, 可不考虑零序分量。

3 转速对反馈电流的影响分析

转速是影响反馈电流计算精度的重要因素^[5]。正常运行时电动机额定转差率通常为 2%~5%之间^[2]。电压跌落时电动机电磁转矩减小, 电动机转速逐渐降低并影响反馈电流的变化过程。本文以额定功率 3 MW, 额定电压 6 kV 的感应电动机为例(参数见表 1 中电动机类型 2), 根据前文推导的计及转速变化的反馈电流表达式, 对转速与反馈电流各分量计算值的关系进行分析。

表1 IEEE Task Force推荐感应电动机负荷模型参数

Table 1 Parameters of induction motor recommended

IEEE Task Force									
类型	R_s /pu	X_s /pu	X_m /pu	R_r /pu	X_r /pu	A	B	T_j	L_{LFm}
1	0.031	0.100	3.2	0.018	0.18	1.0	0	0.70	0.60
2	0.013	0.067	3.8	0.009	0.17	1.0	0	1.5	0.80
3	0.013	0.140	2.40	0.009	0.12	1.0	0	0.80	0.70
4	0.013	0.140	2.40	0.009	0.12	1.0	0	1.50	0.70
5	0.077	0.107	2.22	0.079	0.098	1.0	0	0.74	0.46
6	0.035	0.094	2.80	0.048	0.163	1.0	0	0.93	0.60
7	0.064	0.091	2.23	0.059	0.071	0.2	0	0.34	0.80

注: 1 表示工业小容量电动机; 2 表示工业大容量电动机; 3 表示水泵; 4 表示厂用电; 5 表示民用综合电动机; 6 表示民用和工业综合电动机; 7 表示空调综合电动机。

3.1 转速变化对稳态分量的影响

反馈电流变化规律决定于电动机定转子磁链的变化过程。在电动机参数确定的情况下，定转子磁链是端电压矢量的函数，其系数受转速影响。将式(12)、式(13)重写为

$$\boldsymbol{\psi}_{sf}(t) = \left(\frac{L_s}{Z_{s1}} + \frac{L_m}{Z_{r1}} \right) \boldsymbol{u}_{sf,1}(t) + \left(\frac{L_s}{Z_{s2}} + \frac{L_m}{Z_{r2}} \right) \boldsymbol{u}_{sf,2}(t) = \chi_{s1} \boldsymbol{u}_{sf,1}(t) + \chi_{s1} \boldsymbol{u}_{sf,2}(t) \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{rf}(t) = \left(\frac{L_m}{Z_{s1}} + \frac{L_r}{Z_{r1}} \right) \boldsymbol{u}_{sf,1}(t) + \left(\frac{L_m}{Z_{s2}} + \frac{L_r}{Z_{r2}} \right) \boldsymbol{u}_{sf,2}(t) = \chi_{r1} \boldsymbol{u}_{sf,1}(t) + \chi_{r1} \boldsymbol{u}_{sf,2}(t) \quad (20)$$

χ_{s1} 、 χ_{s2} 与 χ_{r1} 、 χ_{r2} 分别为定子磁链正负序系数与转子磁链正负序系数。图 2 是根据式(19)、式(20)得到的定转子磁链正负序系数与转差率的关系。图 3 是根据式(18)得到的定子正负序等效导纳 $1/Z_{s1}$ 、 $1/Z_{s2}$ 与转差率的关系。

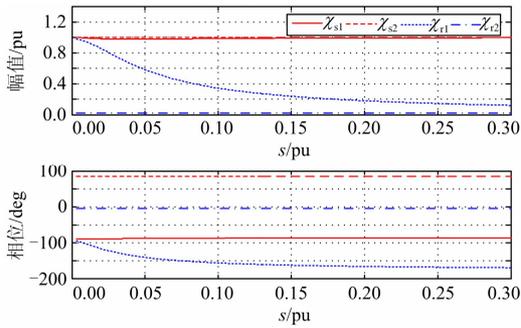


图 2 磁链正负序系数与转速的关系

Fig. 2 Relations between speed and flux linkage positive & negative sequence coefficient

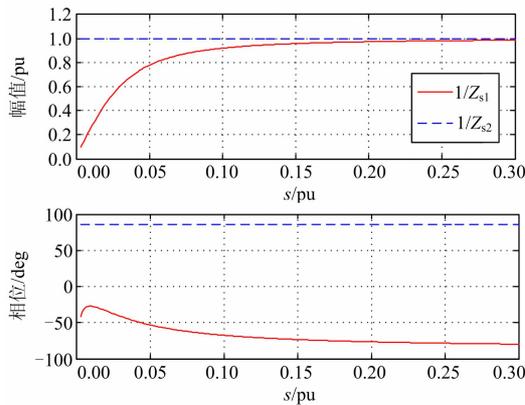


图 3 定子等效导纳与转速的关系

Fig. 3 Relations between speed and stator equivalent admittance

由图 2 可见，电压跌落时定子磁链正负序系数 χ_{s1} 、 χ_{s2} 受转速影响小；转子磁链正序分量系数 χ_{r1}

受转速影响较大，转差率变化 0.1 pu 时相应的转子磁链正序系数下降为 1/3，相位变化接近 60° ；转子磁链负序系数 χ_{r2} 接近于 0，几乎不受转速的影响。

由图 3 可见，转速对定子正序等效导纳 $1/Z_{s1}$ 影响较大，转差率变化 0.05 pu 对应的电动机 $1/Z_{s1}$ 增大为原来的 8 倍，相位变化接近 50° ；转速对定子负序等效导纳 $1/Z_{s2}$ 的影响较小，因此电压跌落时定子电流正序稳态分量随转速降低而增大，定子电流负序稳态分量与转速无关。

电压跌落时电动机转速与额定转速变化不大， $\boldsymbol{\psi}_{sf,t,0}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{rf,t,0}$ 的幅值相位都相差不大（见图 2）。由于电压跌落时电磁转矩小于负载转矩，电动机转速下降。在电压跌落程度不变的情况下，定子磁链正序分量 $\boldsymbol{\psi}_{s,t,1}$ 幅值和相位受转速的影响较小；转子磁链正序分量 $\boldsymbol{\psi}_{r,t,1}$ 幅值随转速减小而减小，并且定转子磁链正序分量间的相位随转速减小而增大（见图 2）。由式(5)可知，由于 $L_r \approx L_m$ ，定转子磁链正序稳态分量的矢量差增大，所以定子电流正序稳态分量随转速下降而增大，对应矢量图如图 4 所示。类似地，因为定转子磁链的负序分量幅值及相位受转速影响不大（见图 2），所以定子电流负序稳态分量受转速影响较小。

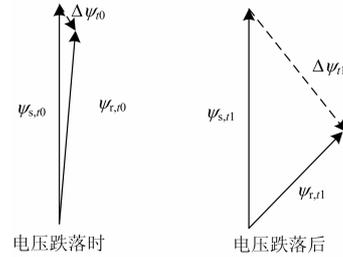


图 4 电压跌落时定子磁链正序稳态分量

Fig. 4 Steady state component of stator/rotor positive sequence flux vector after voltage dip

3.2 转速变化对暂态分量的影响

电压跌落瞬间为保持定转子磁链守恒定转子侧均会产生直流衰减电流。感应电动机反馈电流的直流衰减分量按照定子时间常数衰减；转子频率交流衰减分量是由转子侧直流衰减电流在定子侧感应产生的，并按转子时间常数衰减。 λ_1 、 λ_2 可按式(14)、式(15)计算，其实部和虚部分别对应转速频率交流衰减分量和直流衰减分量的衰减速度及振荡频率，图 5 为根据文献[19]方法计算得到的 λ_1 、 λ_2 与转速的关系。

由图 5 可见，转差率 s 在 0~0.3 变化时， λ_1 、 λ_2 的实部几乎不受转速影响； λ_1 的虚部随着转差率线性变化， λ_2 的虚部不受转速影响。这是由于 λ_1 对

应自由分量是转子侧感应电流引起的, λ_1 虚部即为转子转速 $\omega_r=(1-s)\omega_s$; 而 λ_2 对应自由分量是定子侧感应电流引起的, λ_2 的虚部为0。

综上所述, 转速主要影响感应电动机反馈电流的正序稳态分量, 而对负序稳态分量、转速频率衰减分量和直流衰减分量的影响较小。因此计算感应电动机反馈电流时, 应考虑转速对正序稳态分量的影响。

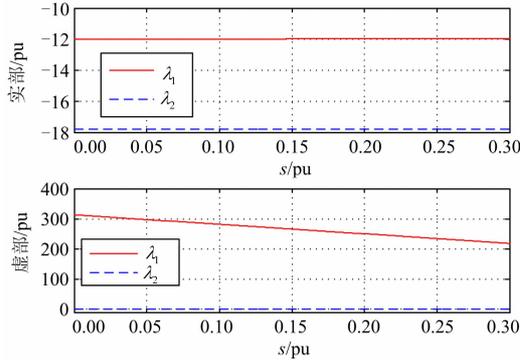


图5 特征值与转速的关系

Fig. 5 Relations between speed and characteristic

3.3 电压跌落时感应电动机转速计算

感应电动机静态等值电路如图1所示。三相对称跌落时, 感应电动机电磁转矩仅包含正序分量 T'_{e1} ; 三相不对称电压跌落时, 感应电动机电磁转矩包含正序分量 T'_{e1} 和负序分量 T'_{e2} 。三相不对称电压跌落后感应电动机的电磁转矩为

$$T'_e = T'_{e1} + T'_{e2} \quad (21)$$

其中:

$$T'_{e1} = \frac{R_r}{s} I_{r1}^2 = \frac{R_r}{s} \frac{|U_{sf,1}|^2}{(R_s + R_r/s)^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}$$

$$T'_{e2} = \frac{R_r}{2-s} I_{r2}^2 = \frac{R_r}{2-s} \frac{|U_{sf,2}|^2}{[R_s + R_r/(2-s)]^2 + \omega_s^2 (L_{ls} + L_{lr})^2}$$

三相跌落时感应电动机电磁转矩 $T'_e = T'_{e1}$ 。电压跌落后感应电动机转子运动方程为

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T'_e - T_m) \quad (22)$$

设电压跌落时 $t=t_0$, 则电压跌落 t 时刻感应电动机转速为

$$\omega_r(t) = \frac{1}{2H} \int_{t_0}^t T'_e(t) dt - \frac{T_m}{2H} (t - t_0) \quad (23)$$

式(21)中电压跌落后感应电动机电磁转矩 T'_e 动态变化与转速相关, 采用矩形积分求解式(23), 转速递推公式为

$$\omega_r(t_k) = \omega_r(t_{k-1}) + \frac{\Delta t}{2H} [T'_e(t_{k-1}) - T_m] \quad (24)$$

式中, Δt 为转速迭代步长。

4 仿真分析

采用本文算法计算配网 BC 两相接地故障引起感应电动机端电压下降 0.75 pu 时反馈电流, 比较提出算法与 PSCAD 中 5 阶电动机模型的仿真结果。单机配电网结构如图 6 所示, 通过改变比例系数 $p(0 \leq p \leq 1)$ 值, 可以使感应电动机接入点的开路电压按固定比例跌落。图中系统等值电抗 X_{th} 为电动机基准阻抗的 1/100, $X_{th}/R_{th}=10$, 电动机额定功率为 3 MW, 额定电压为 6 kV (详细参数见表 1 类型 2)。

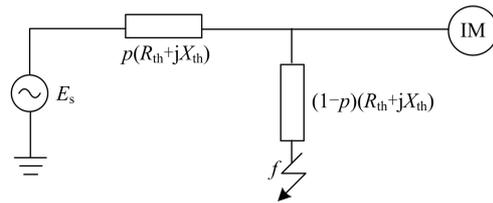


图6 单感应电动机系统结构图

Fig. 6 Single-line diagram of a one IM system

图7为反馈电流仿真值及计算值的对比图。

由图7可以看出, 本文推导的计及转速的反馈电流表达式能够比较准确地估计感应电动机各相反馈电流, 计算误差小于5%。

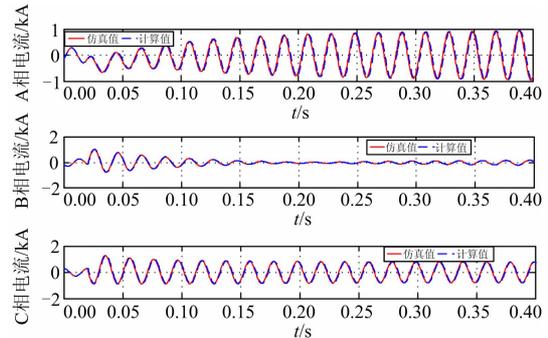


图7 反馈电流仿真值及计算值对比

Fig. 7 Simulation result and calculation result of feedback current

感应电动机模型分别采用恒转速感应电动机模型和恒转矩感应电动机模型, 比较考虑转速变化与否对反馈电流仿真结果的影响, 如图8所示。

选择第15个周波的反馈电流为稳态值。由图8可见, 不考虑转速变化与考虑转速变化得到的正序电流有效值存在较大差异, 而负序电流有效值接近相等。对于正序电流有效值而言, 由于电压跌落

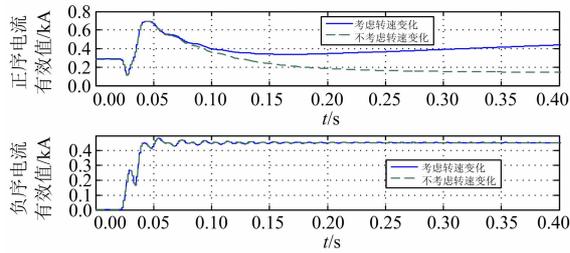


图 8 转速对反馈电流计算影响

Fig. 8 Influence of speed to feedback current

5 个周波内电动机转速变化不大, 是否考虑转速变化得到的反馈电流仿真结果基本一致。随着电压跌落持续时间增加, 转速下降程度增加, 不考虑转速变化得到的正序电流有效值与考虑转速变化得到的正序电流有效值的差值增大。在电压跌落 15 个周波后, 考虑转速变化的正序电流有效值是不考虑转速变化的正序电流有效值的 2.5 倍。可见转速对反馈电流正序稳态值计算结果影响较大。因此电动机反馈电流计算中应考虑转速对反馈电流正序分量计算结果的影响。

5 结论

发生电压跌落时, 感应电动机反馈电流成分比较复杂并且受转速等多方面因素的影响。本文提出了电压跌落时计及转速变化的感应电动机反馈电流计算方法, 并进一步探讨了转速对磁链和反馈电流各分量的影响。经仿真验证表明:

1) 该计算方法能够准确计算电压跌落时感应电动机反馈电流;

2) 电压跌落过程中转速变化主要影响反馈电流正序分量, 对负序稳态分量、转速频率衰减分量和直流衰减分量的影响较小;

3) 随着转速的减小, 反馈电流正序分量增大, 忽略转速对反馈电流正序分量的影响会引起较大的反馈电流计算误差。

因此, 在计算感应电动机反馈电流时计及转速变化将提高反馈电流计算精度, 有助于减小短路电流计算误差并保证电网保护装置的正确动作。

参考文献

[1] 李卫国, 崔学深, 罗应立, 等. 感应电机快速投入控制参数的解析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 154-160.
LI Wei-guo, CUI Xue-shen, LUO Ying-li, et al. Analytical method on control parameter of quick switching on induction motor load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 154-160.

[2] 王东, 马伟明, 郭云珺, 等. 基于非正弦供电方式的多

相感应电动机建模[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 6-14.

WANG Dong, MA Wei-ming, GUO Yun-jun, et al. Modelling of multiphase induction motor with non-sinusoidal supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 6-14.

[3] 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): 165-170.

HE Ren-mu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement-based load modeling considering frequency characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 165-170.

[4] 黄彦浩, 施浩波, 安宁. IEC60909 标准与 PSASP 短路计算的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 69-74.

HUANG Yan-hao, SHI Hao-bo, AN Ning. Comparison research on the calculation of short-circuit currents of IEC60909 and PSASP short-circuit module[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 69-74.

[5] 刘楠, 唐晓骏. 负荷模型对电力系统短路电流计算的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 144-149.

LIU Nan, TANG Xiao-jun. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 144-149.

[6] 刘楠, 张彦涛. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 187-192.

LIU Nan, ZHANG Yan-tao. Impact of load induction motor on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.

[7] 张志, 彭晓涛, 李晓宁, 等. 改进的多母线船舶电力系统短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2212-2217.

ZHANG Zhi, PENG Xiao-tao, LI Xiao-ning, et al. An improved short-circuit current calculation method for multi-bus ship power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2212-2217.

[8] 欧阳金鑫, 熊小伏. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.

OUYANG Jin-xin, XIONG Xiao-fu. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.

[9] 周念成, 罗艾青, 王强钢, 等. 含多感应发电机的配电网短路计算对称分量法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 65-70.

ZHOU Nian-cheng, LUO Ai-qing, WANG Qiang-gang, et al. Symmetrical components method for short-circuit current calculation of induction generators in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,

- 37(11): 65-70.
- [10] SUWANWEJ W, KUNAKORN A. Estimation of short circuit current due to a group of induction motors using an aggregation model[C] // International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004: 559-563.
- [11] MILANOVIĆ V, AUNG M T, VEGUNTA S C. The influence of induction motors on voltage sag propagation — part I: accounting for the change in sag characteristics[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1063-1071.
- [12] MALJKOVIĆ Z, CETTOLO M, PAVLICA M. The impact of the induction motor on short-circuit current[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(4): 11-17.
- [13] MALJKOVIĆ Z, CETTOLO M, PAVLICA M. Induction motor's contribution to short circuit current[C] // International Conference on Electric Machines and Drives, 1999: 354-356.
- [14] STOJANOVIĆ D, VESELINOVIĆ M, MITROVIĆ N, et al. Calculations and analysis of induction motors impact on short-circuit current[C] // Mediterranean Electrotechnical Conference, 2000: 1076-1079.
- [15] XU Hui-yi. Feedback current impact to distribution network of large capacity motor users[C] // International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010: 1-3.
- [16] DUSTIN F, HABETLER T G, HARLEY R G. Experimental study on the short-circuit contribution of induction machines[C] // IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2013: 960-967.
- [17] 高吉增, 杨玉磊, 崔学深. 感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 45-48.
- GAO Ji-zeng, YANG Yu-lei, CUI Xue-shen. The research of the residual voltage of induction motor after dumping and its influence during restoration[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 45-48.
- [18] 宋帅, 张英敏, 李兴源. 考虑感应电动机故障中电磁转矩变化的节点暂态电压评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 103-108.
- SONG Shuai, ZHANG Ying-min, LI Xing-yuan. Assessment method of transient voltage stability of load bus considering the changing of induction motor electromagnetic torque in fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 103-108.
- [19] 汤光宋. 二维复常系数线性微分系统的通解公式[J]. 南昌高专学报, 1996(4): 8-11.
- TANG Guang-song. General solutions to two-dimension complex constant coefficient linear differential system[J]. Journal of Nanchang Junior College, 1996(4): 8-11.
-
- 收稿日期: 2014-02-27; 修回日期: 2014-05-17
- 作者简介:
- 姜杰(1958-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统保护与综合自动化研究等;
- 许宏(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与自动化. E-mail: wisserious.56025@gmail.com