

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

陆海玲,赵朝会,申合彪,段利聪.
双Y型三相异步电动机不对称运行故障
过程的瞬态分析.
电机与控制应用,2021,48(12):78.



SEARI **NCMS**
上電科 上科電機

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址：上海市武宁路505号 手机：18918357509 电话：021-62574990-436

传真：021-62163904

邮箱：wangcj@seari.com.cn

双 Y 型三相异步电动机不对称运行故障过程的瞬态分析

陆海玲, 赵朝会, 申合彪, 段利聪
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 为了准确判断双 Y 型三相异步电动机不对称运行的故障过程, 依据电机不对称理论, 借助 ANSYS 有限元分析软件, 建立双 Y 型三相异步电动机的仿真模型, 验证了定子绕组不对称时三相电流异常的特性, 分析了电阻不对称率对电机运行特性的影响, 讨论了电机运行故障的三种工况。结果表明, 由绕组不对称导致的三相电流异常是循环放大的, 且三相电流的幅值和相角不对称程度随着故障程度的增大而增大。

关键词: 双 Y 型三相异步电动机; 定子绕组不对称; 瞬态仿真; 故障过程分析

中图分类号: TM 343⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)12-0078-07

doi: 10.12177/emca.2021.129

Transient Analysis of Asymmetrical Operation Fault Process of Double-Y-Type Three-Phase Asynchronous Motor

LU Hailing, ZHAO Chaohui, SHEN Hebiao, DUAN Licong

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to accurately determine the fault process of double-Y-type asymmetric three-phase asynchronous motor, based on the theory of motor asymmetry, with the help of ANSYS finite element analysis software, the simulation model of double-Y-type three-phase asynchronous motor is built, the abnormality of three-phase current under stator winding asymmetry is verified, and the effect of resistance asymmetric rate on the working characteristic of the motor is analyzed. Three operating conditions of motor failure are discussed. The results show that the three-phase current abnormality caused by the winding asymmetry amplifies cyclically, and the degrees of asymmetry of amplitude and phase angle of three-phase current increase with the increase of the fault degree.

Key words: double-Y-type three-phase asynchronous motor; stator winding asymmetry; transient simulation; fault process analysis

0 引言

异步电机定子线圈故障是导致电机失效的主要原因之一, 电机故障的 30% ~ 40% 是由定子故障引起的^[1], 因此对电机定子进行早期的故障检测与诊断有着重要意义。然而, 大型异步电机工作的环境相对复杂, 诊断与检修的条件有限, 对电机故障的快速定位比较困难, 需要在电机出现故

障的前期就需要快速定位电机的故障点, 以及时止损。

在三相异步电动机的各类故障中, 缺相故障极为常见, 具体包括电源欠相(断相)、定子绕组极相组断相、并联支路端线和并绕导线线股断线等^[2]。定子绕组出现断路故障的原因往往是一相绕组接头焊接不良, 运行中故障点产生局部过热, 导致其他两相绕组过电流运转, 长时间运转后绕

收稿日期: 2021-08-04; 收到修改稿日期: 2021-11-05

作者简介: 陆海玲(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为三相异步电动机的故障分析。

赵朝会(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机与电器、电力电子与电力传动。

组温度过高,造成电机绕组烧坏。

目前,定子绕组缺相故障的研究主要是在建立故障模型的基础上,利用对称分量法开展断相分析。当电机因为某种原因一相断开时,绕组由三相对称变为两相不对称,此时电机仍然可以运转,但是长时间运行会导致电机绕组烧坏。因此,及时判断电机缺相运行状态是非常必要的。文献[2]采用多回路模型分析了定子绕组电阻和电感的不对称程度对电机运行特性的影响,但是忽略了温度对绕组电阻产生的影响。文献[3]利用定子三相电流的相位差判断定子绕组有无故障,并进一步判断故障程度。文献[4-5]对定子绕组不对称故障的定子负序阻抗、定子负序电流、功率、磁通等进行了分析。文献[6-7]分别采用多回路数学模型有限元法和 Park 模型有限元法对三相异步电动机定子绕组对称和不对称时的匝间短路故障进行建模,计算了电机内电磁场的参数并进行了详细的分析。文献[8]详细分析了三相异步电动机缺一相时的瞬变过程,验证了电机故障时磁场特性理论分析的正确性。文献[9]以三相电流的相位变化作为故障特征来进行故障诊断。

在三相异步电动机定子绕组故障研究中,未发现双 Y 型定子绕组的故障研究。本文应用 ANSYS 软件搭建双 Y 型绕组的外电路模型,与有限元模型进行耦合,对绕组不同程度的不对称故障进行仿真,观察三相异步电动机在发生缺相故障前的三相绕组电流,根据其相对大小判断故障点。通过该方法可及时定位故障点并加以检修,避免出现绕组烧毁。

1 双 Y 型三相异步电动机的结构

1.1 电机主要参数

本文针对一台 10 000 kW 三相异步电动机进行研究。该电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/kV	6.6	额定电流/A	1 006
额定功率/kW	10 000	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 493
功率因数	0.89	电机效率	0.977
定子槽数	84	定子直径/mm	940
轴向高度/mm	863	绕组接法	2Y

对于大容量的异步电机来讲,设计为正常三相连接时,电压较高,对定子线圈的主绝缘要求较高,槽电流很大,会使定子线圈受到强大的交变电磁场,因此线圈的槽部和端部需要有可靠的固定方式,防止由于电磁振动引起的电机损坏。采用双 Y 型连接是解决这个问题的有效方法之一。

1.2 双 Y 型绕组的接法

电机三相绕组内部采用 2Y 接法,每相由两个相同绕组支路并联而成,由 6.6 kV 电源供电,三相绕组的中性点通过端环连接在一起,如图 1 所示。接触电阻在绕组与端环的连接处。

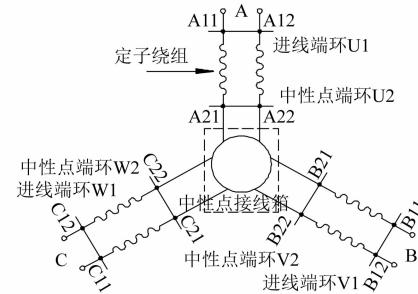


图 1 双 Y 绕组连接示意图

从整体上看,每相等效电路的阻抗参数主要包括电机绕组自身的电抗和电阻,此外还包括接触电阻。为了便于描述,将绕组电阻和接触电阻统一称为相电阻。

本文主要探讨由接触电阻增大导致相电阻增大,进而引起三相电流异常的情况。

2 双 Y 型三相异步电动机的模型

2.1 ABC 坐标系下三相异步电动机的计算

理想条件下,定子绕组 Y 接,根据电磁感应定律和基尔霍夫第二定律可知,三相异步电动机的电压方程可以表示为

$$\mathbf{U} = \mathbf{RI} + \mathbf{p}\Psi \quad (1)$$

式中: \mathbf{U} 为定子和转子电压的瞬时值, $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_s \quad \mathbf{U}_r]^T$, \mathbf{U}_s 和 \mathbf{U}_r 分别为定子和转子的相电压列阵, $\mathbf{U}_s = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T$, $\mathbf{U}_r = [u_a \quad u_b \quad u_c]^T$; \mathbf{I} 为定子和转子电流的瞬时值, $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_s \quad \mathbf{I}_r]^T$, \mathbf{I}_s 和 \mathbf{I}_r 分别为定子和转子的相电流列阵, $\mathbf{I}_s = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T$, $\mathbf{I}_r = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$; $\mathbf{R} = [\mathbf{R}_s \quad \mathbf{R}_r]^T$, \mathbf{R}_s 和 \mathbf{R}_r 为定子绕组和转子绕组的电阻矩阵,对于对称的三相电机,若定子每相电阻为 R_1 ,转子

每相电阻(归算值)为 R_2 ,则有 $\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_1 & \\ & & R_1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_2 & & \\ & R_2 & \\ & & R_2 \end{bmatrix}$; p 为微分算子。

磁链可以用矩阵表示为

$$\Psi = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{M}_{sr} \\ \mathbf{M}_{rs} & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_s \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{L}_s 和 \mathbf{L}_r 分别为定子绕组和转子绕组的电感矩阵;

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_1 & -M_1 & -M_1 \\ -M_1 & L_1 & -M_1 \\ -M_1 & -M_1 & L_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_2 & -M_2 & -M_2 \\ -M_2 & L_2 & -M_2 \\ -M_2 & -M_2 & L_2 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为定子各相绕组的自感和转子各相绕组的自感(归算值); $-M_1$ 和 $-M_2$ 分别为定子三相绕组间的互感和转子三相绕组间的互感(归算值)。

\mathbf{M}_{sr} 为转子对定子的互感矩阵; \mathbf{M}_{rs} 为定子绕组对转子绕组的互感矩阵; $\mathbf{M}_{rs} = \mathbf{M}_{sr}^T$,且

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{sr} &= M_{Aa} \cdot \\ &\begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: M_{Aa} 为定子A相和转子a相绕组轴线重合时两者互感的幅值(归算值)。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{p}{2} \mathbf{I} \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{I}^T = p \mathbf{I}_s \frac{\partial \mathbf{M}_{sr}}{\partial \theta} \mathbf{I}_r^T \quad (5)$$

三相异步电动机的缺相运行实际上是电机不对称运行的极端情况。三相异步电动机缺相故障前的状态,故障支路的接触电阻随着温度变化而不断变化,定子绕组的电阻不对称。电流异常是一个相互影响、循环放大的过程,即由某种原因导致某相电流先出现异常后,会逐步扩大,最后引起三相异常,故无法用对称分量法分析。

上述过程中,电流增大时,会导致相电阻上消

耗的功率增加,发热严重,引起温度升高,进而导致相电阻增大,其温度与电阻的关系如下。

电阻值 $R = \rho \times \frac{L}{S}$,其中 L 为导体长度, S 为导体截面积, ρ 为电阻系数。

电阻系数与导体的材料和温度相关,通常铜导体在15℃时 $\rho = 0.0175 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。铜导体的电阻系数与温度的关系为

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{234.5 + T_2}{234.5 + T_1} \quad (6)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为对应温度 T_1 和 T_2 时的电阻系数。

假设以 $T_1 = 25^\circ\text{C}$ 常温时的电阻为参考基准,显然温度 T_2 越大,其对应的电阻也越大。

根据电机不对称运行理论分析可知,当电机出现绕组阻抗、供电电源或绕组异常等情况时,会出现不对称运行。定子三相电流、定子磁动势也随之变得不对称。大型电机中,接触电阻或绕组老化等原因会引起相电阻增大,且在故障发生初期,电机运行受故障的影响并不明显,当达到一定程度后,三相电流不平衡现象会变得突出。若不采取积极的措施,任由故障进一步恶化,强大的冲击电流会将绕组烧毁,进而威胁电机的正常运行。

2.2 仿真模型的建立

根据电机的基本参数和额定数据,用ANSYS软件对电机本体进行几何建模,如图2所示,包括定子铁心、定子绕组、转子铁心、转子鼠笼导条和非磁性转轴。采用有限元法进行静磁场计算,求出相应的阻抗参数值和磁链参数值,构建电机的数学模型,进而完成电机性能的计算。

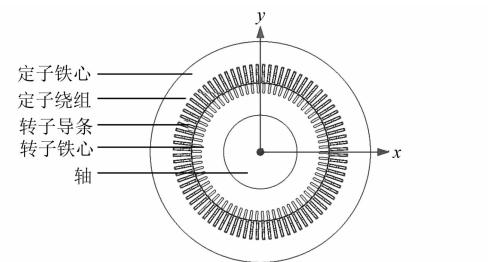


图2 电机2D模型

2.3 外电路模型的搭建

电机与外部的连接(如接触电阻、供电电源)需要采用外电路的形式,运用ANSYS软件模块

Maxwell circuit editor 建立外电路模型。整个定子绕组的外电路由三相电源、三相负载和三相输电线路组成。外电路供电电源为对称 Y型连接的三相电源,由 3 个同频率、等幅值、初相依次超前 120° 的正弦电压源连接而成,三相电压源负极性端子依次连接,再从正极性端子 A、B、C 向外引出端线。把三相负载连接在端线上,3 个负载阻抗连接成 Y型就构成 Y型负载。考虑二维场计算时的端部补偿效应,将端部电阻和端部电感串联

到电机绕组回路中,电机回路主要由电机绕组、电感和电阻元件组成。考虑电机接线端由于安装不当或者长期使用导致接线松动产生的接触电阻,在外电路中加入绕组与电源连接处和绕组与中性点连接处的接触电阻。

本次仿真的电机定子三相绕组内部采用 2Y 接法,相当于将两个 Y型负载并联,因而每相是两个并联支路。计算时采用的外电路如图 3 所示。

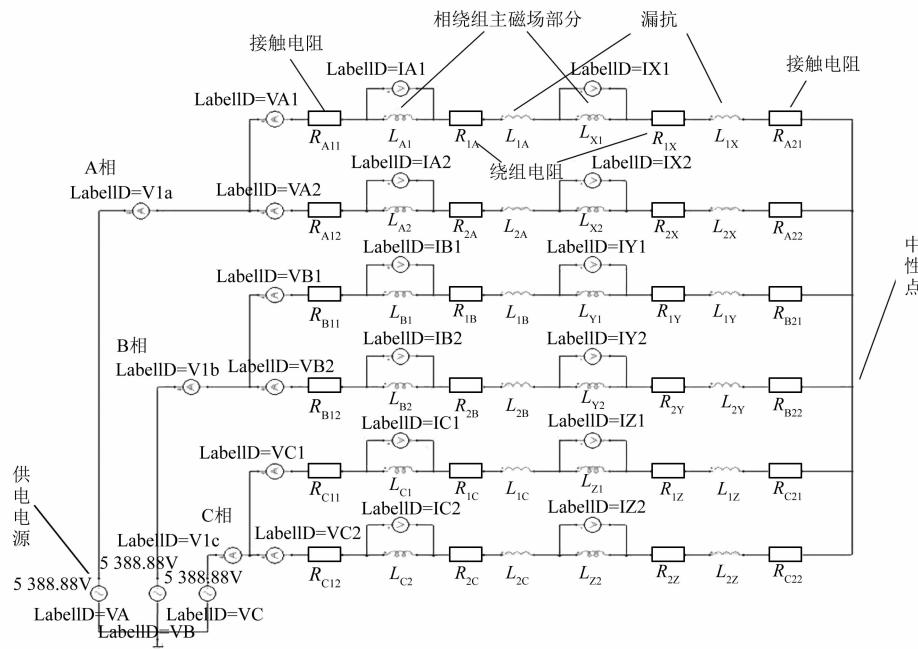


图 3 计算时采用的外电路

3 有限元仿真与分析

3.1 定子电阻不对称时的三相电流特性分析

利用 ANSYS 软件进行仿真分析,在处理与定子各回路有关的电感系数时,将每个线圈作为一个回路,验证一相电阻不对称导致的三相电流变化,从而推导出电机最先发生故障的故障点。假设正常情况下的接触电阻为 $0.000\ 1\ \Omega$,电机出现故障表现为接触电阻的增大。

定子三相绕组及三相电源电压理想对称,电机正常运行时,三相绕组电阻大小相同,如图 4 所示,三相异步电动机的定子三相电流平衡。

假设由于某种故障,B 相接触电阻增大,为便于分析,将外电路简化为图 5。

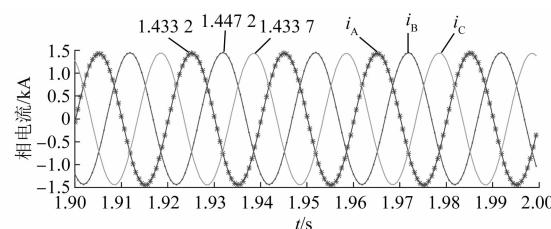


图 4 三相阻抗对称时三相电流波形

设三相对称电源为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_{\angle 0^\circ} \\ \dot{U}_B = U_{\angle 120^\circ} \\ \dot{U}_C = U_{\angle -120^\circ} \end{cases} \quad (7)$$

三相不对称负载阻抗为

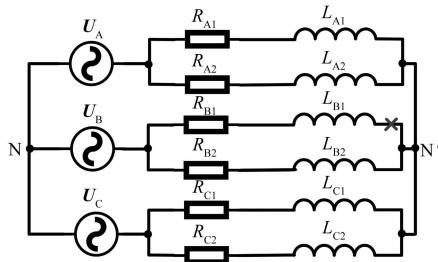


图 5 外电路简化图

$$\begin{cases} Z_A = a_A + jb_A \\ Z_B = a_B + jb_B \\ Z_C = a_C + jb_C \end{cases} \quad (8)$$

其中, $a_A = a_C < a_B$, $b_A = b_B = b_C$ 。

电机功率因数 $\lambda = \cos \varphi = 0.89$, 设 $\frac{b_A}{a_A} = \tan \varphi = 0.51$, $\varphi = 27.13^\circ$ 。

可根据节点电压法列出方程:

$$\left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} \right) \dot{U}_{NN'} = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} \quad (9)$$

由图 5 得:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{NN'} + \dot{U}_{AN} = \dot{U}_{NN'} + U_{\angle 0^\circ} \\ \dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{NN'} + \dot{U}_{BN} = \dot{U}_{NN'} + U_{\angle 120^\circ} \\ \dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{NN'} + \dot{U}_{CN} = \dot{U}_{NN'} + U_{\angle -120^\circ} \end{cases} \quad (10)$$

从而可以得到三相电流

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN'}}{Z_A} = \frac{\dot{U}_{NN'} + U_{\angle 0^\circ}}{a_A + jb_A} \\ \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN'}}{Z_B} = \frac{\dot{U}_{NN'} + U_{\angle 120^\circ}}{a_B + jb_B} \\ \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN'}}{Z_C} = \frac{\dot{U}_{NN'} + U_{\angle -120^\circ}}{a_C + jb_C} \end{cases} \quad (11)$$

又因为 $a_A = a_C < a_B$, $b_A = b_B = b_C$, 所以 $\varphi_1 < \varphi$ 且 $|a_A + jb_A| < |a_B + jb_B|$, 根据式(9)得

$$\frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{U_{\angle -60^\circ}}{a_A + jb_A} + \frac{U_{\angle 120^\circ}}{a_B + jb_B} \quad (12)$$

$\frac{U_{\angle -60^\circ}}{a_A + jb_A}$ 和 $\frac{U_{\angle 120^\circ}}{a_B + jb_B}$ 的相位如图 6(a) 所示。通过

平行四边形法将两个相位相加, $\frac{U_{\angle -60^\circ}}{a_A + jb_A} + \frac{U_{\angle 120^\circ}}{a_B + jb_B}$ 的相位范围为 $(-150^\circ, -60^\circ - \varphi)$ 。

又由式(9)得

$$\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} = \frac{2}{a_A + jb_A} + \frac{1}{a_B + jb_B} \quad (13)$$

其中, $\frac{2}{a_A + jb_A}$ 和 $\frac{1}{a_B + jb_B}$ 的相位如图 6(b) 所示。

相似地, $\frac{2}{a_A + jb_A} + \frac{1}{a_B + jb_B}$ 的相位范围为 $(-\varphi, -\varphi_1)$ 。

由此得到 $\dot{U}_{NN'}$ 的相位范围为 $(-150^\circ + \varphi, -60^\circ - \varphi + \varphi_1)$, 如图 6(c) 所示。

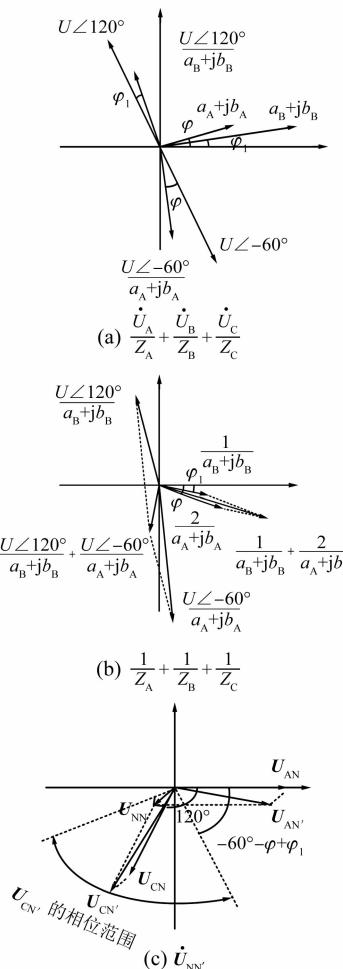


图 6 阻抗不对称故障下的定子三相电流

$\dot{U}_{AN} = U_{\angle 0^\circ}$, $\dot{U}_{CN} = U_{\angle 120^\circ}$, 又因为 $\dot{U}_{NN'}$ 的相位小于 -60° , 所以 $|\dot{U}_{AN'}| < |\dot{U}_{CN'}|$, 因为 A 相和 C 相的阻抗模值相同, 所以能得出 C 相电流大于 A 相电流。因此可以得出, B 相电阻最大时, $i_C > i_A$ 。B 相电阻最大时的三相电流波形如图 7 所示。A 相电阻最大和 C 相电阻最大时, 电流相对大小的分析同上。

由此可以看出,电流异常是个相互影响、循环放大的过程。由上述计算可以推导出B相电阻大→C相电流大→(发热引起)C相电阻大→A相电流大→(发热引起)A相电阻大→B相电流大→(发热引起)B相电阻大→下一轮。

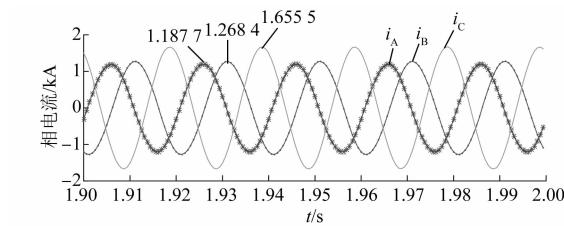


图 7 B 相电阻最大时三相电流波形

由图 7 可以看出,B 相电阻增大,导致 C 相电流最大,符合上述推导。C 相电流增大时,C 相电阻上消耗的功率增加,发热严重,根据式(6),温度升高,导致 C 相的相电阻增大。

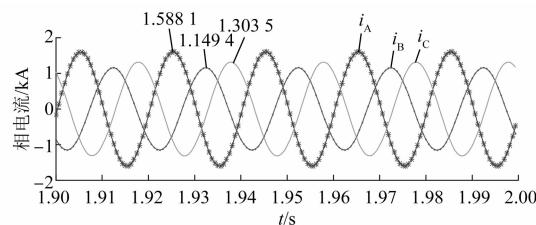


图 8 C 相电阻最大时三相电流波形

由图 8 可以看出,C 相电阻增大,导致 C 相电流减小,继而 A 相电流最大,符合上述推导。A 相电流增大时,A 相电阻上消耗的功率增加,发热严重,导致 A 相的相电阻增大。

A 相相电阻增大,其他两相正常时的电流波形如图 9 所示。

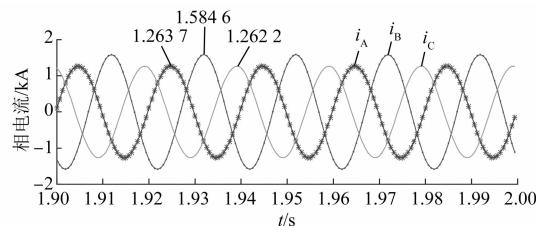


图 9 A 相电阻最大时三相电流波形

由图 9 可以得出,A 相电阻增大,导致 B 相的电流最大,B 相发热严重,进而 B 相的相电阻升高。由此进入下一个循环,直到某一相绕组温度升高到极限值而烧断,电机缺相运行一段时间后停止。

3.2 定子电阻不对称率对电流的影响

以 A 相电阻最大、B 相次之、C 相正常为例,介绍定子电阻的不对称率对电流的影响。

定义定子电阻的不对称率 γ_R ,其表达式为

$$\gamma_R = R_f / R_n \quad (14)$$

式中: R_f 为故障相的相电阻; R_n 为正常状态下的相电阻。

这里以定子绕组 A 相和 B 相故障,C 相正常为例进行分析。按照定义,A 相和 B 相电阻的不对称率为

$$\gamma_{R,A} = R_{f,A} / R_n, \gamma_{R,B} = R_{f,B} / R_n \quad (15)$$

式中: $R_{f,A}$ 和 $R_{f,B}$ 分别为故障状态下定子 A 相和 B 相绕组的电阻。

通过仿真得到不同不对称率条件下的三相电流波形,如图 10~图 12 所示。

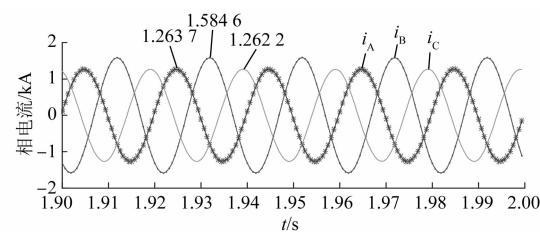


图 10 $\gamma_{R,A} = 25, \gamma_{R,B} = 5$ 时的三相电流波形

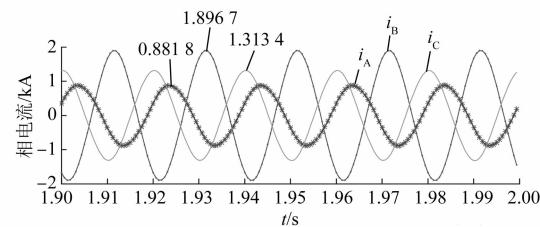


图 11 $\gamma_{R,A} = 100, \gamma_{R,B} = 10$ 时的三相电流波形

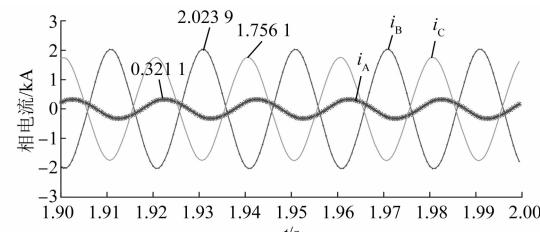


图 12 $\gamma_{R,A} = 400, \gamma_{R,B} = 20$ 时的三相电流波形

将以上结果用向量表示,如图 13 所示。

由上述仿真可直观地得出以下结论:三相定子电阻不对称时,三相电流的相角和幅值均不对称,且随着定子电阻不对称率的增大,三相电流的相角

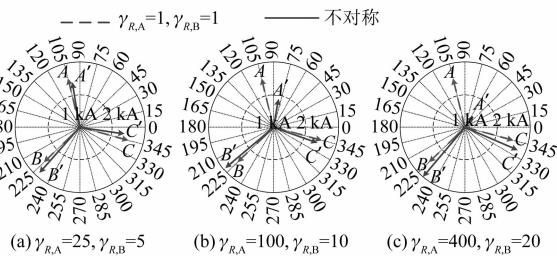


图 13 电阻不对称情况下定子三相电流

和幅值不对称程度也会相应增大。在电机的实际工作中,在故障情况未知的情况下,可通过测量三相电流的有效值及其变化趋势来判断故障情况。

3.3 定子电阻不对称工况

对一台 10 000 kW, 6.6 kV 的鼠笼式双 Y 型三相异步电动机进行研究。该电机定子环如图 14 所示。仿真其出现故障的三种工况:(1)B 相接触电阻最大,A、C 两相正常;(2)C 相接触电阻最大,A、B 两相正常;(3)C 相接触电阻最大,B 相接触电阻次之,A 相正常。A、B、C 三相的接触电阻见图 3。

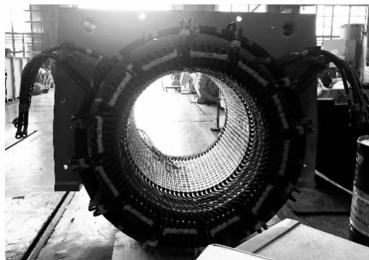


图 14 试验电机的定子环

工况 1 描述:C21 断开(C22 接触电阻正常,C11/C12 正常),假设 B(B11/B12)接触电阻最大为 0.6 Ω。A(A21/A22/A11/A12)、B(B21/B22)正常。结果如图 15 所示。

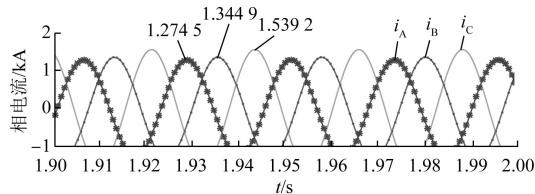


图 15 工况 1 的三相电流

工况 2 描述:C21 断开(C22 接触电阻最大,为 0.6 Ω,C11/C12 正常),A(A21/A22/A11/A12)、B(B21/B22/B11/B12)正常。结果如图 16 所示。

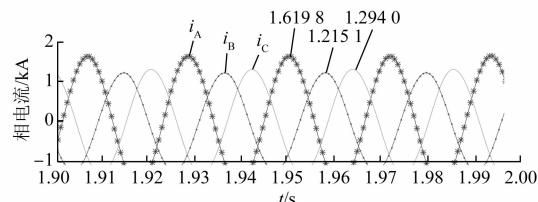


图 16 工况 2 的三相电流

工况 3 描述:C21 断开(C22 接触电阻最大,为 0.6 Ω,C11/C12 正常),B(B11/B12)接触电阻次之为 0.3 Ω。A(A21/A22/A11/A12)、B(B21/B22)正常。结果如图 17 所示。

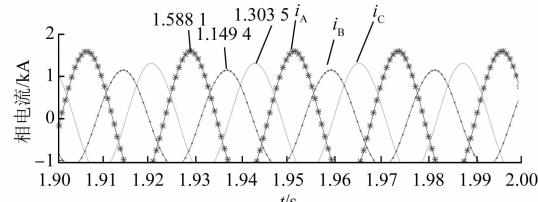


图 17 工况 3 的三相电流

4 结语

本文对双 Y 型三相异步电动机的定子绕组电阻不对称故障进行建模和仿真,结果表明:

(1) 三相电流异常是一个相互影响、循环放大的过程,B 相电阻增大会导致 C 相电流最大,C 相电阻发热导致 C 相的相电阻增大,又导致 A 相电流最大,同理,A 相电阻增大,B 相电流最大,发热引起 B 相相电阻增大,产生循环,直至绕组烧断。

(2) 定子绕组的不对称程度越大,三相电流的幅值和相角的不对称程度也越大。当电机在运行中定子绕组出现故障时,可以通过观察三相电流的变化判断电机的故障相,及时检修,避免电机烧毁。

【参考文献】

- [1] 方芳,杨士元,侯新国,等.派克矢量旋转变换在感应电机定子故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报,2009,29(12):99.
- [2] 李利,李平,金福江,等.三相异步电动机空载时定子阻抗不对称故障模型[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(1):139.

(下转第 93 页)

列这一特点,本文构建的 Kmeans-VMD-LSTM 预测模型比其他 2 种模型的预测精度有着极大的提升,可为后续电网的调度运行和解决风电消纳问题提供参考。

【参考文献】

- [1] 陈锴. 促进风电消纳的电力系统经济调度研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
- [2] 魏忻, 石强, 符文熹, 等. 考虑 CEEMDAN 样本熵和 SVR 的短期风速预测 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 207.
- [3] 刘建华, 李锦程, 杨龙月, 等. 基于 EMD-SLSTM 的家庭短期负荷预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 40.
- [4] 吴宇杭, 温步瀛, 江岳文, 等. 基于变分模式分解和深度门控循环网络的风速短期预测模型 [J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 59.
- [5] 邢恩恺. 基于改进 VMD 预处理与双向 LSTM 的风功率预测研究 [D]. 吉林:东北电力大学, 2019.
- [6] 李宏, 褚丽鑫, 刘庆强, 等. SG-VMD-SVD 的信号去噪方法研究 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2021, 39(2): 158.
- [7] 张妍, 韩璞, 王东风, 等. 基于变分模态分解和 LSSVM 的风电场短期风速预测 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 194.
- [8] 张容畅. 含风力发电和储能系统的电力系统经济调度研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [9] 郑近德, 陈敏均, 程军圣, 等. 多尺度模糊熵及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 振动工程学报, 2014, 27(1): 145.
- [10] 耿志远, 黄晴. 深度学习在移动无线网络中的应用 [J]. 电子商务, 2018(9): 13.
- [11] 邱浩, 赵学军, 张自力. 基于 LSTM-Adaboost 模型的商品期货投资策略研究 [J]. 南方金融, 2018(8): 62.
- [12] 夏春晓. 基于 Tensorflow 的航道智能服务系统研究 [D]. 大连:大连海事大学, 2019.
- [13] 范磊, 卫志农, 李慧杰, 等. 基于变分模态分解和蝙蝠算法-相关向量机的短期风速区间预测 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 93.
- [14] 章国勇, 伍永刚, 张洋. 基于集成经验模态分解和量子细菌觅食优化的风速预测模型 [J]. 太阳能学报, 2015, 36(12): 2930.
- [15] 陶齐宇, 余传锦, 李永乐, 等. 基于经验值分解及 Elman 神经网络的桥址区风速预测 [J]. 灾害学, 2017, 32(4): 85.

(上接第 84 页)

- [3] 孙丽玲, 李和明, 许伯强. 基于多回路数学模型的异步电动机内部故障瞬变过程 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 35.
- [4] 马宏忠, 张志艳, 张志新, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50.
- [5] WU Q, NANDI S. Fast single-turn sensitive stator inter-turn fault detection of induction machines based on positive and negative sequence third harmonic components of line currents [C]//2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.
- [6] ARKAN M, KOSTIC-PEROVIC D, UNSWORTH P J. Modeling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 75(1): 57.

- [7] DEVANNEAUX V, DAGUES B, FAUCHER J, et al. An accurate model of squirrel cage induction machines under stator faults [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 63(3): 377.
- [8] 杨志峰, 翟超, 李小兵. 感应电机定子绕组缺相故障诊断的仿真与研究 [J]. 大电机技术, 2007, 17(5): 25.
- [9] 董建园, 段至善, 熊万里. 异步电动机定子绕组故障分析及诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 26.
- [10] 赵路杰. 复杂工况条件的感应电机故障诊断研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2020.
- [11] 陈金刚. 笼型三相异步电动机绕组烧毁故障分析 [J]. 防爆电机, 2019, 54(3): 47.