

基于等效电路参数的 异步电动机内部故障仿真

魏臻珠¹, 蒋建东¹, 蔡泽祥²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 推导了鼠笼转子导条断裂故障与参数变化之间的定量关系以及定子绕组匝间短路故障与参数变化之间的定量关系, 提出了一种基于电动机等效电路参数的内部故障仿真方法。该方法物理概念清晰, 与传统的电动机模型相兼容, 可以方便地在常规电动机分析软件中实现。最后利用该方法在 EMTDC/EMTP 中的电动机模型上对电动机内部故障进行了仿真分析。

关键词: 异步电动机; 内部故障; 等效电路参数

中图分类号: TM 343

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047 (2005) 09-0050-03

异步电动机是电力系统等生产过程的重要辅机设备。通过异步电动机内部故障定量分析, 正确认识电动机内部故障的机理和故障后电动机内各个特征量的变化规律, 是实现异步电动机内部故障诊断及保护的有效方法。目前, 分析电动机内部故障的方法主要有对称分量法、多回路法^[1]等。这些方法的共同点是重新建立整个仿真环境, 不能够充分利用现有电力系统仿真软件的资源。

本文首先给出了鼠笼转子导条断裂故障与参数变化之间的定量关系以及定子绕组匝间短路故障与参数变化之间的定量关系, 提出了一种基于电动机等效电路参数的内部故障仿真方法。最后, 利用该方法在 EMTDC/EMTP 中的电动机模型上对电动机内部故障进行了仿真分析。

1 鼠笼转子导条断裂故障与参数变化之间的定量关系

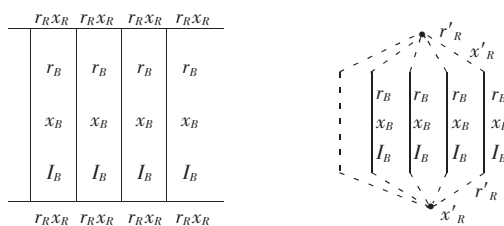
设每根导条的电阻为 r_B , 折算到定子频率后的漏抗为 x_B ; 每段端环的电阻为 r_R , 折算到定子频率后的漏抗为 x_R , 如图 1(a) 所示。现将端环电阻折算到导条里, 这相当于把原来 N_2 边的多边形阻抗化为一个等效的有 N_2 支的星形阻抗, 分别与导条相串联, 如图 1(b) 所示。

根据折算前后的铜耗不变可得折算到导条后的端环电阻 r'_R 应满足下式:

$$r'_R = r_R / (4 \sin^2 \frac{\pi p}{N_2}) \quad (1)$$

由图 1(b) 可见, 鼠笼转子每相等效电阻为

$$r_2 = r_B + 2r'_R \quad (2)$$



(a) 导条和端环阻抗 (b) 把端环阻抗折算到导条里

图 1 鼠笼转子的参数

Fig.1 Parameters of squirrel cage rotor

对于鼠笼转子, 相数 m_2 等于导条数 N_2 , 每相串联数 $w_2 = 0.5$, 绕组因数 $K_{w2} = 1$ 。将转子电阻折算到定子侧为

$$r'_2 = \frac{3(K_{w1}N_1)^2}{0.5^2 N_2} r_2 = \frac{3(K_{w1}N_1)^2}{0.5^2 \times 3} \left(\frac{r_2}{\frac{N_2}{3}} \right) = \frac{12(K_{w1}N_1)^2}{N_2} (r_B + 2r'_R) \quad (3)$$

式中 K_{w1}, N_1 分别为定子绕组的绕组因数和每相串联匝数。

同样, 根据折算前后用于建立漏磁场的无功功率不变, 可得折算到定子侧的转子漏抗为

$$x'_2 = \frac{3(K_{w1}N_1)^2}{0.5^2 N_2} x_2 = \frac{3(K_{w1}N_1)^2}{0.5^2 \times 3} \left(\frac{x_2}{\frac{N_2}{3}} \right) = \frac{12(K_{w1}N_1)^2}{N_2} (x_B + 2x'_R) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以看出, 如果把转子侧看作三相, 每相有 $N_2/3$ 根导条并联, 然后再把其参数折算到定子侧, 其结果与上面推导所得的结果是一样的。

导条断裂后, 假定:

a. 鼠笼转子导条连续断裂, 且断条数小于每极每相导条数;

- b. 鼠笼断条后其余导条中的电流没有变化;
c. 鼠笼断条后定转子侧电抗折算系数不变。

在以上的假设条件下,鼠笼有 n 根导条断裂后,可以认为转子的三相阻抗中非故障相的阻抗不变;故障相由 $(N_2/3-n)$ 根导条并联,其电阻值为

$$r_{2f} = (r_B + 2r_R') / (N_2/3 - n) \quad (5)$$

由于假定鼠笼断条后定转子侧电抗折算系数不变,所以折算到定子侧的转子故障相电阻为

$$r'_{2f} = \frac{12 N_1'^2}{N_2 - 3n} (r_B + 2r_R') = \frac{N_2}{N_2 - 3n} r'_2 \quad (6)$$

同样,折算到定子侧的转子故障相漏抗为

$$x'_{2f} = \frac{12 N_1'^2}{N_2 - 3n} (x_B + 2x_R') = \frac{N_2}{N_2 - 3n} x'_2 \quad (7)$$

比较式(3)和式(6)、式(4)和式(7),可以看出,转子导条断裂后故障相的阻抗值增大,其增大值为

$$\Delta r'_2 = r'_{2f} - r'_2 = \frac{3n}{N_2 - 3n} r'_2 \quad (8)$$

$$\Delta x'_2 = x'_{2f} - x'_2 = \frac{3n}{N_2 - 3n} x'_2 \quad (9)$$

2 定子绕组匝间短路故障与参数变化之间的定量关系

正常运行时定子绕组每相电阻的计算公式为

$$r_1 = K'_F \rho_w \frac{2 N_1 l_c}{S_{c1} a_1} \quad (10)$$

式中 K'_F 为反映挤流效应的电阻增加系数; ρ_w 为基准工作温度时导体的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); l_c 为线圈半匝平均长度(m); S_{c1} 为导体的截面积; a_1 为定子绕组的并联支路数。

定子漏抗的计算公式为

$$x_{\delta 1} = x_{s1} + x_{d1} + x_{E1} = 4 \pi f_1 \mu_0 \frac{N_1^2}{pq} l_{ef} (\lambda_{s1} + \lambda_{d1} + \lambda_{E1}) \quad (11)$$

式中 x_{s1}, x_{d1}, x_{E1} 分别为定子绕组的槽漏抗、谐波漏抗、端部漏抗; $\lambda_{s1}, \lambda_{d1}, \lambda_{E1}$ 分别为定子绕组的槽比漏磁导、谐波比漏磁导、端部比漏磁导; f_1 为基波频率; μ_0 为真空的导磁系数; p 和 q 分别为极对数、每极每相槽数; l_{ef} 为电枢轴向计算长度。定子绕组发生匝间短路后假设:

- a. 忽略匝间短路后绕组相间互感的变化;
b. 忽略短路环在相邻线圈上引起的去磁作用。

这样就可以认为匝间短路故障后定子绕组非故障相的阻抗参数不变,故障相阻抗参数减小。假设有 n 匝发生了匝间短路,用 $N'_1 = N_1 - n$ 代替式(10)和式(11)中的 N_1 即可计算出故障后故障相的阻抗参数,如下式所示:

$$r_{1f} = K'_F \rho_w \frac{2(N_1 - n)l_c}{S_{c1} a_1} \quad (12)$$

$$x_{\delta 1f} = 4 \pi f_1 \mu_0 \frac{(N_1 - n)^2}{pq} l_{ef} (\lambda_{s1} + \lambda_{d1} + \lambda_{E1}) \quad (13)$$

比较式(10)和式(12)、式(11)和式(13),可以看出,发生匝间短路故障后故障相的阻抗值减小,其减小值为

$$\Delta r_1 = r_{1f} - r_1 = K'_F \rho_w \frac{-2 n l_c}{S_{c1} a_1} = \frac{-n}{N_1} r_1 \quad (14)$$

$$\Delta x_{\delta 1} = x_{\delta 1f} - x_{\delta 1} = 4 \pi f_1 \mu_0 \times \frac{n^2 - 2n N_1}{pq} l_{ef} (\lambda_{s1} + \lambda_{d1} + \lambda_{E1}) = \frac{n^2 - 2n N_1}{2 N_1^2} x_{\delta 1} \approx \frac{-n}{N_1} x_{\delta 1} \quad (15)$$

从上面的分析可以看出,转子导条断裂可以等效为转子侧某一相等效电路参数的增大,且其增大值与转子导条断裂根数 n 有明确的定量关系,可以用绕线型异步电机的转子侧某一相上串入外接阻抗 $\Delta Z'_2$ 模拟, $\Delta Z'_2 = \Delta r'_2 / s + \Delta x'_2$, 其中 s 为转差率。匝间短路可以等效为定子绕组某一相等效电路参数的减小,且其减小值与短路匝数 n 有明确的定量关系,可以用在异步电动机的定子侧其中一相上串入外接电抗 ΔZ_1 模拟, $\Delta Z_1 = \Delta r_1 + \Delta x_{\delta 1}$ 。

3 内部故障仿真方法实现

根据文献[2]的验证结果,基于 EMTDC/EMTP 中的绕线型异步电动机模型可以和鼠笼型异步电动机模型等效,并且绕线型异步电动机模型转子侧参数放在电动机里面与串接在电动机外面可以等效,在 EMTDC/EMTP 中的绕线型异步电动机模型转子侧某一相上串接阻抗 $\Delta Z'_2$ 模拟鼠笼转子断条故障,如图 2(a)所示;同样,基于 EMTDC/EMTP 中的异步电动机模型定子侧参数在电动机里面与串接在外面可以等效,在 EMTDC/EMTP 中的异步电动机定子侧某一相上串接阻抗 ΔZ_1 模拟定子绕组匝间短路故障,如图 2(b)所示。

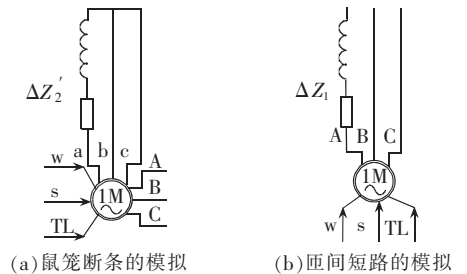


图 2 内部故障仿真方法的实现

Fig.2 Realization of interior fault simulation

4 内部故障仿真结果分析

根据以上提出的故障仿真方法,本文用 Y90S-4 型电动机的参数进行了仿真研究,转子断条时电机满载运行,匝间短路时电机带 30% 负载。

转子断条后定子稳态电流频谱中出现 $(1 \pm 2s)f_1$ 的边频分量,是断条故障的最重要特征。图 3 给出了

转子一根导条断裂后的仿真结果,图 4 给出了转子两根导条断裂后的仿真结果与实验结果,图中的 A 为边频电流的幅值和基频电流的幅值之比。

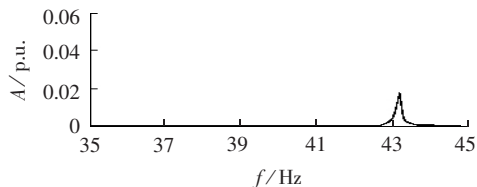
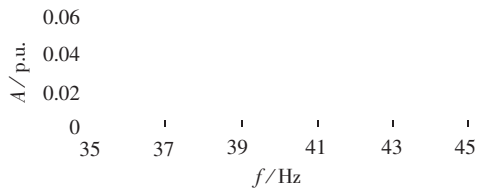
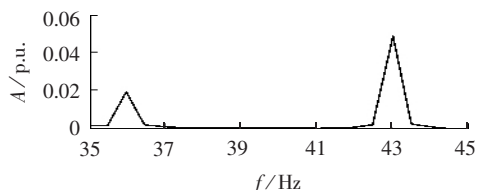


图 3 一根导条断裂后定子电流频谱图

Fig.3 The stator current spectrum with one broken bar



(a) 仿真结果



(b) 实验结果

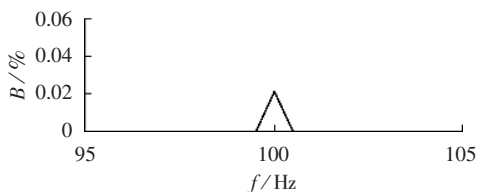
图 4 两根导条断裂后定子电流频谱图

Fig.4 The stator current spectrum with two broken bars

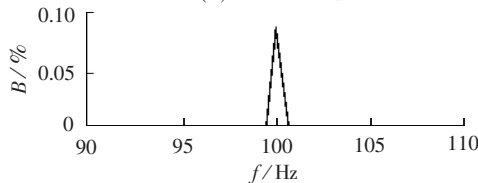
从仿真结果可以看出,两根导条断裂后,42.9 Hz 附近出现幅值约为 0.039 的边频分量;与实际电机实验结果在 43 Hz 附近出现边频幅值约为 0.05 的边频分量非常接近。转子断条后,定子稳态电流频谱图中还出现 $(1 \pm 4s)f_1$ 分量,如实验结果 36 Hz 处出现幅值约 0.02 的该分量,仿真结果 36 Hz 处也出现了该分量,只是幅值较小,表明精度有待于进一步提高。另外,从仿真结果可以看出边频分量大小与断条数目有关,断条数越多边频分量幅值越大,如一根导条断裂时,边频分量幅值约为 0.02,而两根导条断裂时边频分量幅值为 0.039,根据边频分量幅值和基频电流幅值的比可以判断出故障的严重情况。

定子匝间短路后定子电流中出现负序分量,根据扩展派克相量法^[3],定子电流派克相量系数频谱中出现两倍基频($2f_1$)分量,其幅值与匝间短路故障严重情况相关。图 5 给出了匝间短路的仿真结果,图中纵坐标 B 为电流的两倍基频分量与基频分量的比值。从图 5 的仿真可以看出,匝间短路后定子电流派克相量系数中确实出现 $2f_1$ 的频率分量且其幅值随着短路比的增大而增大,与扩展派克相量法得到的结论相符。

由此可见,基于电机参数变化建立的内部故障模型有一定准确性,与实验数据具有可比性,当然,更精确的仿真结果依赖于阻抗参数变化计算值精度的提高。



(a) 2% 匝间短路



(b) 8% 匝间短路

图 5 匝间短路时派克相量系数频谱图

Fig.5 The Park coefficient spectrum of turn-to-turn short fault

5 结论

本文提出了一种基于电动机等效电路参数的内部故障仿真方法,并利用该方法在 EMTDC/EMTP 中的电动机模型上对电动机内部故障进行了仿真。结果表明,不管是断条故障,还是定子匝间短路故障,该方法均有一定的准确度,为异步电动机内部故障仿真提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 高景德,王祥珩,李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [2] 蔡泽祥,高爱云,蒋建东. 基于 EMTDC 的异步电动机内部故障建模及仿真研究[J]. 电工技术学报,2003,18(6): 84-87.
- CAI Ze-xiang, GAO Ai-yun, JIANG Jian-dong. Modeling for interior faults of induction motors and its simulation based on EMTDC[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2003, 18(6): 84-87.
- [3] CRUZ S M A, CARDOSO A J M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach[J]. **IEEE Trans. on Industry Applications**, 2001, 37(5): 1227-1233.
- [4] 王维俭. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京:水利电力出版社,1982.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

魏臻珠(1977-),女,青海西宁人,助教,主要从事电力系统分析与继电保护方面的教学与研究工作(E-mail:jlhbh_wzz@tom.com);

蒋建东(1975-),男,河南南阳人,博士,主要从事电力系统分析与继电保护方面的教学与研究工作;

蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统故障诊断与继电保护,电力系统稳定分析与控制。