

双三相永磁同步电动机一相绕组短路故障性能分析

齐 歌,白左霞,刘宪林,师 黎

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:对双三相永磁同步电动机发生一相短路故障时的磁场分布、磁链、电流以及输出转矩等电磁性能进行分析,并与传统三相电机进行比较.结果表明,双三相电机相与相之间的耦合较弱,故障相几乎不影响非故障相的正常运行,电机依然能够在可接受的范围内继续工作,具有一定的容错能力,适用于对电机连续运行有特殊要求的场合.

关键词:双三相;永磁电机;容错性能;一相短路;

中图分类号:TM351 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.006

0 引言

在航空航天、军事应用、矿井轧钢等对电机可靠性要求较为苛刻的领域中,人们对电机本体容错性能的要求也越来越高^[1-2],即要求电机在系统某部分故障时仍具有一定的工作能力.目前研究较多的容错电机是多相永磁电机.所谓多相电机^[3-4]是指随着电力电子技术日新月异的发展,使得电机驱动系统和定子槽中的相数也不拘于传统三相.与传统三相永磁电机相比,多相电机凭借定子中多增的绕组使其更有优势,比如适用于低压大功率场合、电磁转矩脉动小、效率高、转矩密度高、拥有更多的设计自由度、容错能力更强等优点^[5].双三相永磁同步电机是多相电机中的一种,它是把两套传统三相绕组分别作为两个独立模块,并按一定相移嵌放在同一台电机本体中.两套三相绕组之间的相移可以根据实际工作中的需要来调节,现研究较多的是双三相电机中两套三相绕组之间相移 30°的情况.与传统三相电机相比较,由于双三相电机中两套三相绕组存在 30°电角度的相移,使得电机具有更高绕组系数,进一步提高了电机的输出转矩;并且双三相电机两套三相绕组各产生的电磁转矩叠加后正好消除了 6 次和 18 次谐波,有效地减小了电机转矩脉动^[6].

笔者采用有限元分析方法,对双三相相移

30°永磁同步电动机在故障工况下的运行性能进行分析,与其在正常工况下的性能进行比较,并传统三相电机进行了比较分析.

1 双三相电机模型的建立

根据电机的具体参数,利用 Ansoft Maxwell 2D 软件建立双三相永磁同步电动机的仿真模型^[7-8].与此同时,建立一个传统三相电机模型,其反电动势和定子铜耗均与双三相电机相同,以便在同等条件下进行性能比较.两种电动机的基本参数如表 1 所示.

表 1 表贴式 12 槽 10 极永磁电机参数
Tab.1 Parameters of 12-slot 10-pole
surface-mounted of PM motor

参数	三相电机	双三相电机
定子相数	3	6
额定电流 /A	10	5
额定转矩/(N·m)	5.5	5.5
定子外径/mm	100	100
定子内径/mm	57	57
气隙长度/mm	1	1
永磁体材料性能	$B_r = 1.2\text{ T},$ $\mu_r = 1.05$	$B_r = 1.2\text{ T},$ $\mu_r = 1.05$
定转子铁心材料	transil300_16T	ransil300_16T

收稿日期:2014-08-03;修订日期:2014-11-06
基金项目:河南省科技攻关计划资助项目(122102210098);中国博士后科学基金面上资助项目(2011M501188);河南省博士后项目启动经费资助项目(2010024)
作者简介:齐歌(1982-),女,河南郑州人,郑州大学讲师,博士,主要研究方向新型永磁电机的设计与性能分析,E-mail:qige@zzu.edu.cn.

2 双三相电机相隔离分析

在电机内部,相与相之间的相互影响主要表现在相绕组中电流产生的磁场与其他相的匝链.在双三相相移 30°电机中,定子槽中的两套三相绕组分别为 A1、B1、C1 和 A2、B2、C2,这两套绕组在空间上相差 30°电角度,而每套绕组中各相之间间隔 120°电角度.双三相电机的相磁动势星图和相绕组在电机中的实际分布如图 1 所示.

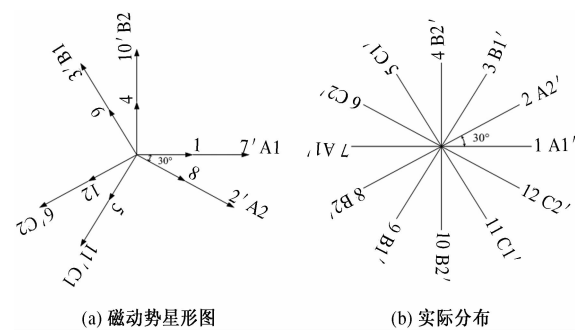


图 1 双三相电机各相绕组线圈分布
Fig. 1 The armature coil distribution of each phase of dual three-phase motor

为了探讨电机中各相绕组之间的相互影响,笔者对两种电机仅一相绕组加激励时的磁场分布情况进行分析,如图 2 所示.

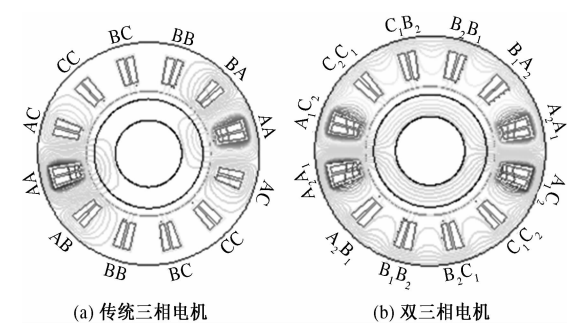


图 2 两种电机的磁力线分布
Fig. 2 Distribution of the magnetic field lines of two kinds of motor

从图 2(a)中可以看出,传统三相电机 A 相激励产生的磁力线除了与自身相匝链外,在很大程度上也影响与其相邻的 B、C 两相.而在图 2(b)中,双三相电机 A1 相激励产生的磁力线除了与自身相匝链之外,还主要影响与其相邻的 A2 和 C2 相,但这种影响的程度显然弱于前述的传统三相电机,A2 和 C2 相附近的磁力线分布较为稀疏.同时,从图中可以看出,A1 相激励对其余三相的影响更加微弱.分析结果说明,与传统三相电机相比,双三相电机相与相之间的耦合程度较弱,一相运行与否以及故障与否对其他相的影响也就较小,因此故障相可以作为一个独立的模块退出整

个系统的运行,并不会导致电机中途瘫痪,进而导致整个系统崩溃.

3 一相绕组短路故障性能分析

在实际运行中,电机定子绕组在热、电、机械摩擦等共同交互作用下,不可避免地会发生一相绕组短路故障.笔者研究的一相绕组短路故障可以看成是一种特殊的绕组匝间短路故障,即发生百分之百匝间短路故障^[8-11].

3.1 各相绕组磁链波形

笔者对双三相电机故障前后各相绕组磁链波形进行分析,并与传统三相电机进行比较,如图 3 和图 4 所示.

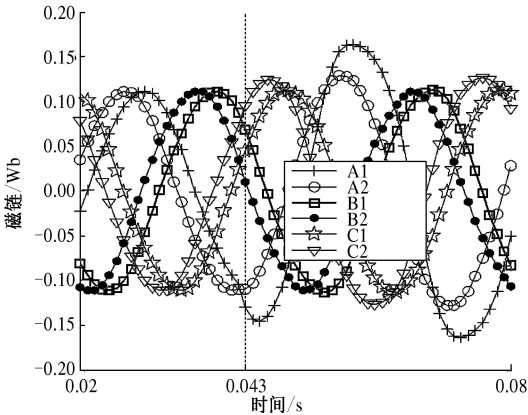


图 3 双三相电机 A1 相短路故障时各相绕组的磁链波形
Fig. 3 Flux linkage waveforms of dual three-phase motor when A1 phase short circuit

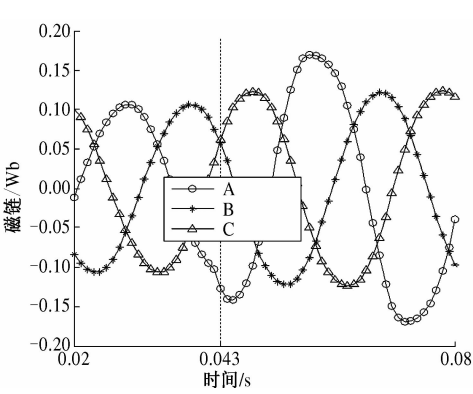


图 4 三相电机 A 相短路故障时各相绕组的磁链波形
Fig. 4 Flux linkage waveforms of the traditional three-phase motor when A phase short circuit

从图 3、4 中可以看出,在 0.043 s 时刻以前两种电机都处于正常工作状态,各相磁链曲线对称,并都具有较好的正弦度;在 0.043 s 时刻电机发生一相短路故障,故障相 A1 相和 A 相磁链幅值瞬间增大,其他非故障相的磁链幅值也都有不同程度的增加,其增加幅度列于表 2.从表 2 中可以看出,在传统三相电机中,其余的 B、C 两相均

受到严重的影响,磁链幅值增长幅度较大;而在双三相电机中,仅与故障相相邻的 A2 相和 C2 相受到严重的影响,而其余各相几乎不受到影响,磁链幅值增加不明显.

表 2 两种电机短路故障后各相绕组磁链幅值的增长情况
Tab.2 Amplitude increment of the flux linkage when short circuit occurred in two motors

各相	双三相电机故障后磁链增长率/%	三相电机故障后磁链增长率/%
A1 相/A 相	47.2	60.0
B1 相/B 相	1.3	14.4
C1 相/C 相	1.2	14.6
A2 相	15.6	—
B2 相	0.1	—
C2 相	14.2	—

3.2 各相绕组电流波形分析

电机在正常运行时发生突然短路故障所经历的时间虽然极短,但对故障时各相绕组短路电流的分析有着非常重要的意义.图 5 和图 6 分别为双三相电机和传统三相电机故障前后各相绕组电流的变化情况,其电流幅值的增长幅度列于表 3.

表 3 两种电机短路故障后非故障相绕组电流幅值增长情况
Tab.3 Amplitude increment of current of Non-fault phase winding when short circuit occurred in two motors

各相	双三相电机故障后电流增长率/%	三相电机故障后电流增长率/%
B1 相/B 相	1.2	70.9
C1 相/C 相	1.9	71.2
A2 相	18.4	—
B2 相	1.6	—
C2 相	35.6	—

从表 3 中可以得出,与传统三相电机相比,双三相电机的非故障相电流在短路故障前后变化幅度较小,并且受故障相影响最为严重的 C2 相电流幅值增大了 35.6%,仅为传统三相电机 B、C 两相电流幅值增长幅度的 1/2.分析结果表明,电机发生故障时,双三相电机与传统三相电机相比较,其非故障相受故障相影响程度较小,几乎能保持原有的运行状态.在图 5(a)和图 6(a)中可以看出,在 0.043 s 时刻两种电机出现一相短路故障,此时故障相绕组中的短路电流幅值瞬间急剧增大,从图 5(b)和图 6(b)看出:非故障相绕组中的电流幅值都有所增加,但程度不同.

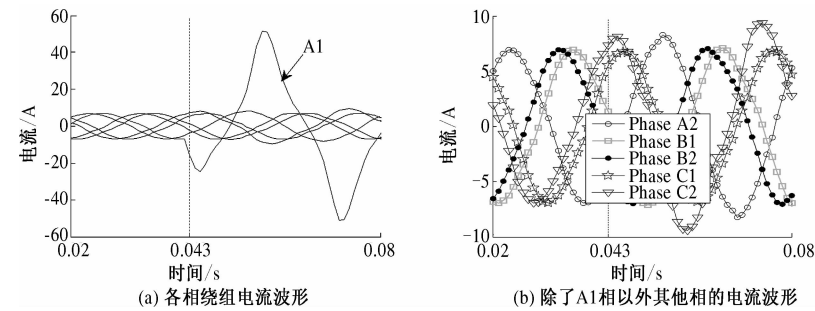


图 5 双三相电机 A1 相短路故障时各相绕组电流波形
Fig. 5 Current waveforms of each phases in dual three-phase motor when A1 phase short circuit

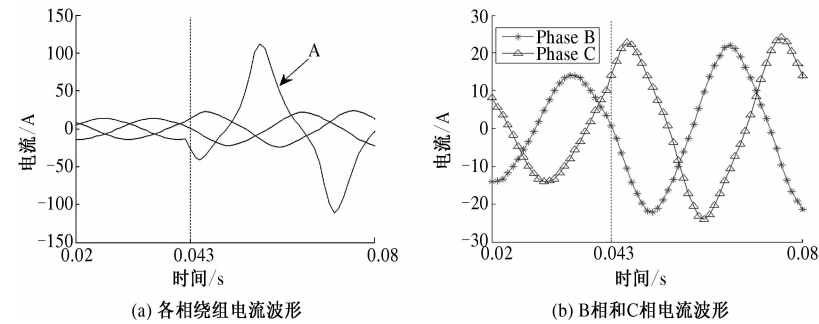


图 6 传统三相电机 A 相短路故障时的各相绕组的电流变化情况
Fig. 6 Current waveforms of each phases in the traditional three-phase motor when A phase short circuit

传统三相电机在一相绕组突然短路时,不仅故障相绕组电流会骤然增大,其余相绕组中的电流也会大幅增加,如果继续运行会使电机绕组过

热而导致烧毁.但从双三相电机故障前后电流变化的情况来看,非故障相电流增加幅度较小,只略大于额定电流,变化最大的 C2 相也不过是正常

运行时的 1.356 倍. 因此如果切断故障相, 在不超过温升的情况下, 双三相电机依然能够短时运行, 而不必中途停机, 这就比传统三相电机有更为显著的带故障运行能力和优势.

3.3 电机转矩性能分析

电机在故障状态时, 输出转矩的能力是衡量容错电机性能的重要指标之一. 为此, 笔者着重对双三相电机发生一相短路故障前后的输出转矩情况进行分析, 考察其带故障运行能力, 并与传统三相电机进行比较, 如图 7 所示.

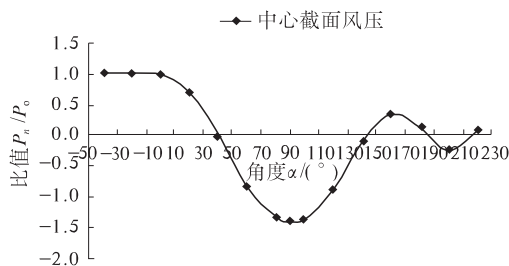


图 7 两种电机短路故障时转矩性能比较

Fig. 7 Comparison of torque performance when short circuit occurred in two motors

(1) 0 ~ 0.043 s: 两种电机都处于正常运行状态, 电机输出转矩均为额定转矩 $5.5 \text{ N} \cdot \text{m}$.

(2) 0.043 ~ 0.08 s: 在 0.043 s 时刻, 两种电机在运行时发生一相突然短路故障, 此时两种电机转矩均骤然增大, 严重影响电机的正常运行. 但双三相电机的转矩波动明显小于传统三相电机, 这体现出了双三相相移 30° 这种绕组结构的优势.

(3) 0.08 ~ 0.12 s: 为防止电机短路相绕组因电流骤然增大迅速升温而烧坏, 并阻止热量影响到其余非故障相工作, 在 0.08 s 时刻迅速切断双三相电机的 A1 相绕组以及传统三相电机的 A 相绕组. 此后在 0.08 ~ 0.12 s 期间, 两种电机依靠非故障相继续运行. 与上一阶段相比, 两种电机的输出转矩波动明显减小, 但是传统三相电机转矩波动依然大于双三相电机. 与额定运行相比, 双三相电机的输出转矩有所降低, 但输出转矩最低值仍可达到 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上且无转矩死区, 但传统三相电机的输出转矩最低值仅为 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$. 比较结果表明, 双三相电机的带故障运行能力优于传统三相电机.

(4) 0.12 ~ 0.16 s: 在上一阶段, 双三相电机切除故障相后电机输出转矩的波动较大. 为进一步改善电机的输出转矩性能, 鉴于双三相绕组的特殊性, 在 0.12 s 时刻, 切断故障 A1 相所在的整

个第一套三相绕组, 仅用剩余的第三套三相绕组工作. 但同时应及时降低负荷, 使之与剩余的激励相匹配, 这样电机才能够继续稳定运行. 从图中可以看到, 双三相电机的输出转矩明显趋于平稳, 并且保持在 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右. 分析结果表明, 双三相电机因其自身独特的电机本体设计使其容错性能更加优越, 使得电机在运行过程中有一套绕组出现问题时, 可以使其退出系统运行, 只利用剩下的另一套三相绕组继续运行, 从而大大提高了电机本体乃至整个系统的可靠性.

4 结论

在一些对电机本体及其控制系统技术指标要求较高的场合, 特别是矿井轧钢、航空航天等对连续运行有较高要求的领域, 要求电机具有一定的容错性能. 笔者主要分析了双三相电机的结构, 以及一相绕组短路故障前后的各相绕组的磁链曲线和电流的变化情况, 以及故障后转矩性能的变化, 并在同等条件下与传统三相电机进行了详细的比较分析. 分析结果表明, 双三相电机在同等故障下运行性能优于传统三相电机. 此外, 双三相电机又因其定子槽中两套绕组的独立性使其容错性能得到进一步提高, 作为新型永磁容错电机有着良好的研究和应用前景.

参考文献:

- [1] 张晓晨, 朱景伟. 双余度永磁容错电机开路故障补救策略研究[J]. 微电机, 2011, 44(9): 5-8.
- [2] 郝振洋, 胡育文, 黄文新, 等. 电力作动器中永磁容错电机及其控制系统的发展[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 149-158.
- [3] 周启章. 多相电机的绕组设计[J]. 电机技术, 2001(1): 3-5.
- [4] 张阔, 夏楠, 王雅楠, 等. 基于空间矢量法的多相电机绕组磁动势的分析[J]. 现代电力, 2010, 27(3): 37-40.
- [5] 王晋, 周理兵, 马志云, 等. 多相永磁无刷直流电动机系统设计与协调控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 53-59.
- [6] QI Ge, MA Ding, ZHOU Li-bing, et al. Analysis of dual three-phase fractional-slot pm brushless ac motor with alternate winding connections[J]. International Conference on Electric and Electronics, 2011, 99: 793-800.

(下转第 32 页)