异步起动永磁电机最大去磁工作点计算新方法及 抗退磁新结构

卢伟甫¹,赵海森¹,朴润浩^{1,2},刘明基¹ (1.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206; 2.金策工业综合大学 电气工程系,朝鲜 平壤 999093)

摘要:异步起动永磁同步电机(LSPMSM)最大去磁工作点发生在起动过程中,采用传统磁路分析法未考虑电机内瞬态磁场分布情况。提出最大去磁工作点计算新方法,可准确计及饱和、集肤效应等多种非线性因素。该方法一方面基于场-路-运动耦合时步有限元模型仿真实际起动状况,确定起动过程中最容易发生去磁的永磁体局部单元位置,并将该单元作为考核单元,揭示瞬态退磁磁场与转速之间的关系;另一方面通过给定转子转速的时步有限元模型计算堵转到同步速一系列转速下稳态运行时的退磁磁场,最终得到同步速退磁磁场作用下永磁体考核单元位置的工作点,即为 LSPMSM 设计校核用的最大去磁工作点。在此基础上,针对一台 22 kW 样机进行抗退磁能力分析,并提出一种有效提高电机抗退磁能力的复合材料转子新结构。最后通过设计磁场实时测量系统得到某台实验电机起动过程中永磁体工作点,验证了所提方法的有效性。

关键词:异步起动永磁同步电机;同步电机;局部退磁;时步有限元法;复合材料导条

中图分类号: TM 343 文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.014

0 引言

异步起动永磁同步电机 LSPMSM (Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor)能够实现异 步起动,并且具有高效率、高功率因数等优点[1-2],然 而在实际推广应用中,退磁问题成为制约其发展的 瓶颈。永磁电机设计中,考核抗退磁能力的主要指标 是最大去磁工作点,即最大退磁磁场作用下的永磁 体工作点磁密,该指标通常与磁路结构有关^[3]。其影 响因素主要是工作温度与退磁磁场大小[4-5]。通常情 况下,较高工作温度会导致永磁体(钕铁硼)退磁曲 线出现拐点,而电机在起动过程中容易产生较大退 磁磁场⁶¹,使得永磁体工作点低于退磁曲线拐点,导 致永磁体矫顽力降低,产生不可逆退磁。因此,在电 磁设计阶段,准确计算并合理设计永磁体最大去磁 工作点,进而提出有效可行的提高永磁电机抗退磁 能力的技术措施,成为目前 LSPMSM 设计中急需解 决的难点问题。

在最大去磁工作点计算方法方面,传统磁路法 无法计及永磁体的局部退磁,难以准确反映永磁体 的实际工作状态,需采用数值计算方法计算最严重 去磁情况下电机内部的磁场分布,使永磁体内最低 局部工作点高于最高工作温度下退磁曲线的拐点, 以保证电机不发生局部退磁^[7-9]。文献[10]利用有限 元数值法分析了 LSPMSM 起动过程中最大去磁电流 下永磁体的局部退磁分布情况,但最大去磁电流仍 是通过等效电路方程计算得到,未计及场与路之间 的耦合作用。

在提高电机抗退磁能力方面,通常采用优化转 子磁路结构以减小退磁磁场或改进通风结构以抑制 永磁体温升等方法实现。文献[11]分析对比了电机 分别采用单、双层及 V 型永磁体 3 种转子结构的退 磁特性。文献[12]表明转子侧加隔磁桥并采用双鼠 笼结构,可抑制永磁体退磁。文献[13]研究了永磁体 高度及等效气隙长度对退磁风险的影响。文献[14] 通过改善冷却措施可显著降低永磁体表面温度,从 而有效防止不可逆退磁。

为了准确计算起动过程中最大退磁磁场,得出 LSPMSM考虑局部退磁的最大去磁工作点,本文提 出一种抗退磁能力校核新方法。该方法一方面利用 计及饱和非线性、谐波磁场等多种因素影响的场-路-运动耦合时步有限元法,分析起动过程中不同时 刻的磁场分布,确定了永磁体最容易退磁的位置并 揭示了退磁磁场与转速之间的关系;另一方面通过 给定转子转速的时步有限元模型,计算电机在堵转 到同步速一系列给定转速下稳定运行时的退磁磁 场,最终得到最大去磁工作点。进一步以一台 22 kW 样机为例,对其抗退磁能力进行分析,提出一种基于 复合材料的用于提高最大去磁工作点的 LSPMSM 的

收稿日期:2015-03-03;修回日期:2016-03-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307050);中国博士 后科学基金资助项目(2014M560935);中央高校基本科研业 务费资助项目(2015ZD03)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51307050), the Postdoctoral Science Foundation of China (2014M560935) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015ZD03)

转子新结构。最后,对一台实验样机起动过程中的动态退磁磁场进行测试,验证了所提方法的有效性。

1 起动过程中退磁磁场时步有限元研究

1.1 永磁体最容易去磁局部位置的确定

为预防起动过程中发生局部退磁,首先确定最容易退磁位置,将其作为考核单元分析起动过程中 退磁磁场与转速之间的关系。以一台 22 kW 8 极铸 铝冲片转子结构 LSPMSM 为分析模型,电机的具体 参数如表 1 所示。

表 1 22 kW LSPMSM 样机参数 Table 1 Parameters of 22 kW LSPMSM prototype

设计参数	铸铝冲片电机参数值
额定电压	380 V
定/转子槽数	48/40
极对数	4
气隙长度	0.65 mm
定子外径	368 mm
转子外径	258.7 mm
永磁体尺寸(宽 x 高)	55.5 mm×5.3 mm
永磁体材料	NdFeB-33EH
100℃ 时永磁体矫顽力	772 000 A/m

首先分析转子表面退磁磁场透入转子铁芯内部 的情况,沿单个转子磁极极间径向,取处于不同位置 的单元,如处于气隙位置的 a 单元、铸铝导条位置的 b 单元、转子铁芯位置的 c 单元,及分别位于永磁体 中心及边角位置的 d 和 e 单元,如图 1 所示。以电机 重载起动为例,采用场-路-运动耦合时步有限元法^[6], 计算得到起动过程中 a—e 单元磁密 B 随时间变化 的曲线,如图 2 所示。

图 2 中,气隙谐波磁场的存在导致气隙单元磁 密随时间变化的波形较为杂乱;由于铁磁材料以及 铸铝导条的集肤效应,越深入转子内部,谐波磁场越 弱。较气隙和转子导条位置,处于转子内部的永磁体 受谐波磁场影响小,磁密波形光滑。d 单元与 c 单元



图 1 单个转子磁极不同位置单元 Fig.1 Elements at different positions in single-pole rotor



图 2 重载起动过程中不同位置磁密随时间变化的曲线 Fig.2 Flux density variation during heavy-load startup for different positions

大致处于同一个径向位置上,这2个位置的磁密变 化波形相似。e单元与其他永磁体单元相比漏磁较 大,在任意时刻磁密都较低,更容易受退磁磁场影 响,该位置即为最容易退磁位置。故选择 e 单元作为 考核单元,研究起动过程中退磁磁场与转子转速之 间的关系。

1.2 起动过程中退磁磁场与转速之间的关系

起动过程中,由定子绕组电流和转子导条电流 共同产生的同步速旋转磁场,超前以转子速旋转的 永磁磁场 δ 空间电角度。 $\cos\delta$ 可表征同步磁场作用 在永磁磁场方向上的分量的正负和大小,当 $\cos\delta > 0$ 时,同步磁场对永磁体起增磁作用,永磁体内磁密增 大;当 $\cos\delta < 0$ 时,同步磁场相对永磁体即为退磁磁 场,永磁体内磁密减小,当 $\cos\delta = -1$ (即 $\delta = \pi$)时,去 磁作用较强,永磁体磁密较低^[15]。

图 3 为利用时步有限元法分析得到的重载起动 过程中的转子转速 n_r 、cos δ 和永磁体考核单元磁密 B_{teo} 由图 3 所示结果可以看出,LSPMSM 重载起动过 程中多次出现同步磁场与永磁磁场反相时刻(即 cos δ = -1 的时刻,对应图 3 中标记点"×"),因此 B_{te}



图 3 重载起动过程中 $n_r, \cos\delta, B_w$ 随时间变化曲线 Fig.3 Variation curves of $n_r, \cos\delta$ and B_w during heavy-load startup

多次出现较低点。为观察反相时刻退磁磁场与转速之间的对应关系,图4给出了 B_{te} 随转速 n_r 变化的曲线。同时,表2列出了每个反相时刻(图4中标记点"×")下的转速 n_{rl} 和永磁体考核单元工作点磁密 B_{tel}。



图 4 重载起动过程中,永磁体最容易去磁位置 单元磁密 B_{te} 随转速变化曲线

Fig.4 Curve of B_{te} vs. rotor speed during heavy-load startup

	表	2	重载起	动过程	中反	相时	刻对	应的	$n_{\rm rl}$ 7	$B_{ m tel}$
--	---	---	-----	-----	----	----	----	----	----------------	--------------

Table 2 $n_{\rm rl}$ and $B_{\rm tel}$ at reverse instants during heavy-load startup

t/s	$n_{\rm rl}/({ m r}\cdot{ m min}^{-1})$	$B_{\rm tel}/{ m T}$	t/s	$n_{\rm rl}/({ m r}\cdot{ m min}^{-1})$	$B_{\rm tel}/{ m T}$
0.025	29.5	0.4179	0.343	152.8	-0.1751
0.046	44.4	0.2806	0.368	164.9	-0.1824
0.067	42.6	0.1941	0.394	188.5	-0.1882
0.089	52.6	0.1245	0.421	206.4	-0.1919
0.111	64.8	0.0465	0.449	230.9	-0.1979
0.133	71.4	-0.0129	0.479	257.7	-0.2015
0.155	67.6	-0.0598	0.510	282.5	-0.2097
0.178	83.7	-0.1072	0.543	313.8	-0.2165
0.200	80.7	-0.1313	0.578	354.8	-0.2262
0.223	91.1	-0.1492	0.618	399.1	-0.2382
0.246	104.5	-0.1575	0.663	453.8	-0.2523
0.270	111.0	-0.1622	0.717	523.5	-0.2674
0.293	118.8	-0.1657	0.797	634.6	-0.2965
0.318	137.2	-0.1727			

由图 4 和表 2 可见,在转速较低时,由于转差率 较大,永磁体磁密波动较快,且定子起动电流幅值 较大,感应电动势幅值较小,定、转子电流合成的同 步磁场相对较弱,对永磁磁场影响较小,因此永磁体 磁密波动幅值较小。随着转速升高,同步磁场增大, 波动幅值增大,反相时刻下的 B_{ul} 减小。在该重载起 动过程中最后一个 $\cos\delta = -1$ 时刻(如图 3 和图 4 中 的圆圈标记),转速 n_d 达到 85% 同步速。此时,同步 磁场对永磁磁场的去磁作用最强,从而使得永磁体 考核单元工作点达到该重载起动过程中的最低点。

虽然该重载起动过程中的最后一个 cosδ=-1 时 刻对应的转速已经达到 85% 的同步速,但是该转速 对应的最低工作点还不是真正意义上的设计校核用 的最大去磁工作点。因为如果 LSPMSM 在更恶劣的 情况下起动,LSPMSM 长时间爬行^[16],最后一个 cosδ=-1 时刻对应的转速更大,即更接近同步速时, 退磁磁场更大。因此,为了找出真正意义上的最大去 磁工作点,需要建立计算模拟各个特定转速下退磁 磁场的有限元模型。

2 最大退磁磁场的有限元计算

2.1 分析计算方法

计算某一特定转速下退磁磁场的方法是:假设 永磁电机在转差率 s 下异步稳定运行,在 $\delta = \pi$ 时刻 的同步速旋转磁场即为该转速下的退磁磁场。由于 要模拟 LSPMSM 在某一特定转速下稳定运行,所以 需将时步有限元运动方程中的转子机械角速度设 定为某一给定转速 $s\Omega_n^{[17]}$,其中 Ω_n 为同步速对应的 转子机械角速度。当 s=0 时,表明给定转子转速为同 步速。某一给定转子转速下退磁磁场有限元计算模 型如下式所示:

式(1)中,第1行为磁场方程,其中A 为矢量磁位, F_A 为永磁体等效面电流形成的列向量,K 为节点向量 磁位系数矩阵,S、E 分别为定、转子电流对应的系数 矩阵,P 为转子导条涡流项对应系数矩阵;第2行为 定子电路方程,其中 U_s 为定子三相电压列向量, I_s 为定子三相电流组成的列向量, R_s 、 $L_{\sigma s}$ 分别为定子绕 组电阻、电感系数矩阵,M 为定子电路方程中感应电 动势对应的系数矩阵;第3行为转子电路方程中感应电 阻、电感系数矩阵,N 为转子电路方程中感应电动势 对应的系数矩阵;第4行和第5行为转子运动方程, 其中 Ω 为转子机械角速度, θ 为转子位置角, Δt 为计 算时间步长。

2.2 异步转速下退磁磁场计算

采用 2.1 节给定转速有限元分析方法计算各个 异步转速下的退磁磁场如图 5 所示,图中给出了 s=0.65 和 s=0.15 时各个转速稳态情况下,一个基频脉 动周期 $T_0/s(T_0$ 表示电源的工频周期)内的电磁转 矩 $T_{\rm em}$ 、定子三相电流 $I_{\rm ABC}$ 、cos δ 和 $B_{\rm te}$ 随时间的变化 曲线。

由图 5 可见,异步转速下同步磁场与转子永磁 磁场相对旋转 0~2 π 电角度, B_{le} 作相应的波动变化, 当同步磁场与永磁磁场方向相反(即 cosδ=-1 时刻) 时, B_{le} 出现较低点,此刻的同步磁场即为该转速下对





应的退磁磁场。随着转差率 *s* 减小,电磁转矩的波动 幅值明显减小,定、转子电流幅值减小,相应的同步 磁场增大,因此在反相时刻退磁磁场增大。*s* = 0.65 和 *s* = 0.15 异步转速下对应的永磁体考核单元最低 工作点磁密分别为-0.21 T、-0.3269 T。

2.3 同步速下退磁磁场计算

采用 2.1 节给定转速有限元分析方法,计算转 差率 s=0 即同步速情况下的退磁磁场。同步速下同 步磁场与转子永磁磁场相对位置,与转子初始位置 角和电压源初始相位值有关。为了得到不同相对位 置下的永磁体工作点,本文保持转子初始位置角不 变,通过改变电压源初始相位角,计算得到稳态运行 时δ在-90°~270°范围内永磁体考核单元的工作点 变化情况。

以稳态运行时 δ =180°为例,计算得到一个工频 周期内定子三相电流 I_{ABC} 和永磁体考核单元工作点 磁密 B_{le} 如图 6 所示。由图 6 结果可知,相比于异步 速,同步速稳态运行时定子电流幅值恒定,永磁体工 作点 B_{le} 保持不变。计算得到不同 δ 下的 B_{le} ,如图 7 所示。

由图 7 可见,当-90°<δ<90°时,同步磁场对永



Fig.7 Curve of B_{te} vs. δ at synchronous speed

磁体起增磁作用;当90°<δ<270°时,同步磁场对永 磁体起去磁作用;当δ=180°时,永磁体工作点B_{te}较 低,此刻的同步磁场即为同步速下对应的最大退磁 磁场。

2.4 最大去磁工作点确定

表 3 列出了利用 2.1 节给定转速时步有限元模型计算得到的各个转速 n_{rl} 对应的退磁磁场作用下的永磁体考核单元磁密 B_{tel}。由表 3 中的结果可知, 各转速下的退磁磁场随着转速升高而增大。同步速 下的退磁磁场达到最大退磁磁场,同时该退磁磁场 作用下的考核单元磁密即为 LSPMSM 的最大去磁工 作点磁密。

表 3 各转速退磁磁场作用下 B_{tel} Table 3 B_{tel} in demagnetization field for different rotor speeds

unicient totor speeus							
s	$n_{\rm rl}/({ m r}\cdot{ m min}^{-1})$	$B_{\rm tel}/{ m T}$	s	$n_{\rm rl}/({ m r}\cdot{ m min}^{-1})$	$B_{\rm tel}/{ m T}$		
1.00	0	0.1950	0.40	450.0	-0.2667		
0.95	37.5	0.0610	0.35	487.5	-0.2770		
0.90	75.0	-0.0950	0.30	525.0	-0.2883		
0.85	112.5	-0.1500	0.25	562.5	-0.2997		
0.80	150.0	-0.1700	0.20	600.0	-0.3120		
0.75	187.5	-0.1850	0.15	637.5	-0.3269		
0.70	225.0	-0.1960	0.10	675.0	-0.3400		
0.65	262.5	-0.2100	0.07	697.5	-0.3509		
0.60	300.0	-0.2200	0.05	712.5	-0.3572		
0.55	337.5	-0.2300	0.02	735.0	-0.3661		
0.50	375.0	-0.2445	0	750.0	-0.3700		
0.45	412.5	-0.2565					

将表 3 中永磁体考核单元磁密与转速之间的关 系曲线,与表 2 利用时步有限元计算的实际起动过 程中瞬态出现的永磁磁场与同步磁场反相时考核 单元磁密与转速之间的关系曲线进行了比较,如图 8 所示。



图 8 给定转速有限元模型和时步有限元模型的 退磁磁场计算结果比较

Fig.8 Comparison of calculated demagnetization field between constant-speed finite element model and time-stepping finite element model

通过图 8 中的对比曲线可知,两者计算结果基本一致。其中,当转子转速低于约 5%同步速时,两者之间存在一定误差。主要原因是 LSPMSM 起动初期,定子电流中存在非周期分量,三相电流除产生一个同步旋转的磁场外,还会产生一个空间静止不动的衰减磁场^[18]。该磁场会影响起动初始阶段的磁路饱和程度以及气隙磁密波动幅值,而给定转速有限元模型并没有计及这一衰减磁场,所以在转子转速较小时两者计算结果会存在一定的误差。考虑到给定转速有限元模型的主要目的是计算同步速时的最大退磁磁场。所以上述计算误差不会影响最大去磁工作点计算结果的准确度。因此,文中给定转速有限元模型计算最大退磁磁场并得到校核所用的最大去磁工作点是可行的。

3 提高抗退磁能力的复合材料转子新结构

3.1 理论角度定性分析

如何减小作用到永磁体的退磁磁场,从而提高 电机抗退磁能力是进一步考虑的问题^[19]。本文提出

一种复合材料转子新结构,即在普通转子导条两侧增加容易制造的导磁导 电复合材料,在不降低起 动性能的基础上为退磁磁 场提供漏磁路,减少透入 永磁体的退磁磁场。改进 槽型结构如图9所示。

3.2 抗退磁能力比较



Fig.9 Structure of composite material bar

利用 2.1 节有限元分析方法,计算得到电机采 用改进槽型后各个转速下的退磁磁场,与采用原有 槽型比较,如图 10 所示。由图 10 可见,改进槽型后, 各转速下作用到永磁体的退磁磁场明显减小,同步 速对应的最大去磁工作点磁密为-0.1466T,与原有 槽型的 -0.37T 相比,提高了 60.38%。同时图 11 给 出了同步速最大退磁磁场作用下 2 种结构电机每极 转子磁场分布图。可见改进结构电机永磁体平均工 作点高于普通槽型电机。复合材料转子新结构可为 进一步深入研究如何提高 LSPMSM 抗退磁能力提供 理论依据。



图 10 普通转子导条和复合材料导条电机退磁磁场比较

Fig.10 Comparison of demagnetization field between normal bar and composite material bar



图 11 最大退磁磁场作用下 2 种结构电机磁场分布图 Fig.11 Flux distribution in largest demagnetization field for two motor structures

4 实验验证

永磁电机是否发生了不可逆退磁一般通过考核 空载感应电动势 E₀ 是否明显降低来判断^[20],并未涉 及转子磁场的实际测量。为验证有限元模型计算 分析起动过程中退磁磁场的有效性,本文采用文献 [21]所述的测试系统对一台普通笼型转子实验电机 进行动态磁场测量,测试时在被测永磁体一侧,开一 个狭窄的安放霍尔磁场测量元件的槽,霍尔输入输 出信号线经转轴的中心钻孔引出,并与滑环相连,实 现信号线的动静转换,最终通过数据采集系统实时 获得永磁电机转子磁场数据。

永磁同步电机的定子绕组通电起动,转子转速 从零初始速度逐渐加速到同步速,将实时测量得到 的与时步有限元计算得到的瞬态起动过程中永磁体 某一单元磁场变化情况进行对比,如图 12 所示。



图 12 起动过程永磁体磁场测量与计算结果对比 Fig.12 Comparison between calculated and measured permanent magnet flux densities during startup

由图 12 可见,实测得到实验样机起动过程中永 磁体磁场的变化趋势与计算结果基本一致。由于所 用霍尔测量元件量程范围有限,且仿真条件如磁场

94

测量位置、电机转动惯量、永磁体矫顽力等不能完全 等同于实际运行条件,导致实测与计算结果在数值 上存在一定差异。但实验结果和计算结果都表明 LSPMSM 起动过程中存在较强退磁磁场,永磁体工 作点多次处于较低点,容易产生动态不可逆退磁。实 测结果证实了采用有限元计算最大退磁磁场的必要 性和可行性;实时测量磁场方法还为检验永磁电机 抗退磁能力设计是否满足要求、现场运行条件是否 安全提供一种手段。

5 结论

a.利用计及饱和、涡流等多种因素影响的有限 元法,计算得到的同步速下永磁体最容易去磁位置 的最低工作点,即为准确校核 LSPMSM 抗退磁能力 的最大去磁工作点;

b. 最大去磁工作点的磁密大小与电机结构有 关,本文提出一种有利于提高 LSPMSM 抗退磁能力 的复合材料转子鼠笼新结构,较传统导条结构电机, 永磁体最大去磁工作点磁密提高约 60.4%;

c. 通过设计用于转子磁场测量的实验样机及相 关测试系统,实现了永磁电机起动过程动态退磁磁 场的测量。验证了起动过程中永磁体工作点多次处 于较低点容易产生动态退磁这一特点,进一步表明 本文计算最大去磁工作点方法的有效性和必要性。

本文研究成果为准确校核 LSPMSM 抗退磁能力 提供一种方法,并为深入研究抗退磁措施从而预防 永磁电机实际运行中退磁提供必要的理论支撑。

参考文献:

- 周羽,李槐树,黄克峰.带输出滤波器的永磁同步电机系统的逆 变器最大功率因数研究[J].电力自动化设备,2014,34(5):93-97.
 ZHOU Yu,LI Huaishu,HUANG Kefeng. Maximum power factor of inverter for PMSM system with output filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):93-97.
- [2] KIM K C,KIM K,KIM H J,et al. The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 42(10): 3485-3487.
- [3] XING Junqiang, WANG Fengxiang, WANG Tianyu, et al. Study on anti-demagnetization of magnet for high speed permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3):856-860.
- [4] SEBASTIAN T. Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(2):353-357.
- [5] WANG J, WANG W, ATALLAH K, et al. Demagnetization assessment for three-phase tubular brushless permanent-magnet machines
 [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(9):2195-2203.
- [6] 卢伟甫,刘明基,罗应立,等. 自起动永磁同步电机起动过程退磁 磁场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(15):53-60.

LU Weifu,LIU Mingji,LUO Yingli,et al. Demagnetization field analysis and calculation for line-start permanent magnet synchronous motor during start process [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(15):53-60.

- [7] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社, 1997:185-188.
- [8] ZHOU P,LIN D,XIAO Y,et al. Temperature-dependent demagnetization model of permanent magnets for finite element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2):1031-1034.
- [9] FU W N,HO S L. Dynamic demagnetization computation of permanent magnet motors using finite element method with normal magnetization curves [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3);851-855.
- [10] KANG G H,HUR J,NAM H,et al. Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finiteelement method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (3):1488-1491.
- [11] KIM K C, KIM K, KIM H J, et al. Demagnetization analysis of permanent magnets according to rotor types of interior permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6);2799-2802.
- [12] SHEN Jianxin, LI Peng, JIN Mengjia, et al. Investigation and countermeasures for demagnetization in line start permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013,49(7):4068-4071.
- [13] WU Fan,ZHENG Ping,SUI Yi,et al. Design and experimental verification of a short-circuit proof six-phase permanent magnet machine for safety critical applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11):8204304.
- [14] MCFARLAN J D, JAHNS T M. Investigation of the rotor demagnetization characteristics of interior PM synchronous machines during fault conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2768-2775.
- [15] 卢伟甫,罗应立,赵海森. 自起动永磁同步电机起动过程电枢反应退磁分析[J]. 电机与控制学报,2012,16(7):29-33.
 LU Weifu,LUO Yingli,ZHAO Haisen. Armature reaction demagnetization analysis for line-start permanent magnet synchronous motor during start process [J]. Electric Machines and Control, 2012,16(7):29-33.
- [16] FEI W, LUK P C K, MA J, et al. A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10):4724-4727.
- [17] 付媛,罗应立,陈伟华,等. 自起动永磁电动机的稳态转矩波动研究[J]. 电机与控制学报,2010,14(11):1-6.
 FU Yuan,LUO Yingli,CHEN Weihua,et al. Research on torque fluctuation of line-start PM motor based on time-step finite element method [J]. Electric Machines and Control, 2010,14(11):1-6.
- [18] 赵海森,李志强,张健. 自起动永磁电机初始状态对起动冲击电流和冲击转矩的影响[J]. 电机与控制应用,2010,37(8):10-13. ZHAO Haisen,LI Zhiqiang,ZHANG Jian. Influence of initial state on starting inrushing current and impact torque of line-start permanent magnet motor[J]. Electric Machines & Control Application,2010,37(8):10-13.

[19] 卢伟甫,赵海森,刘明基,等. 自起动永磁电机复合材料转子导 条的优化[J]. 电机与控制学报,2013,17(1):1-6.

LU Weifu,ZHAO Haisen,LIU Mingji,et al. Optimization of the composite material rotor bar for a line-start permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control,2013,17 (1):1-6.

- [20] KIM K T,LEE Y S,HUR J. Transient analysis of irreversible demagnetization of permanent-magnet brushless DC motor with interturn fault under the operating state[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5):3357-3364.
- [21] 王博,赵海森,李和明,等. 电动机微机自动化测试系统误差分 析及改进方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):67-71.

WANG Bo, ZHAO Haisen, LI Heming, et al. Analysis of measurement error for electric motor test system and countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(6):67-71.

作者简介:



卢伟甫(1983—),女,河北保定人,博士, 博士后,研究方向为永磁电机理论与运行; 赵海森(1982—),男,河北邢台人,副教 授,博士,研究方向为电机内电磁场数值 计算、电机系统节能及新型节能电机研究

朴润浩(1971-),男,朝鲜平壤人,讲

师,硕士,研究方向为电机电磁场数值计算、

(E-mail: zhaohisen@163.com);

卢伟甫

电机设计;

刘明基(1969—),男,河南南阳人,副教授,博士,研究方 向为交流电机理论及运行控制。

Calculation of worst working point and anti-demagnetization structure for line-start permanent magnet synchronous motor

LU Weifu¹, ZHAO Haisen¹, PIAO Runhao^{1,2}, LIU Mingji¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Kimchaek University of Technology, Pyongyang 999093, DPR of Korea)

Abstract: The worst working point of LSPMSM (Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor) occurs during its startup and the traditional magnetic circuit analysis does not consider the transient magnetic field distribution inside the motor. A method for calculating the worst working point is proposed, which precisely considers different nonlinear factors, such as saturation, skin effect, etc. It simulates the actual startup conditions based on the field-circuit-motion coupled time-stepping finite element model to determine the most easily demagnetized part of permanent magnet, and takes this part as the objective element to reveal the relationship between the transient demagnetization field and the rotor speed. It then calculates the steady-state demagnetization field based on the time-stepping finite element model for a series of given rotor speeds, from locked speed to synchronized speed. The working point of the objective element in the demagnetization field at synchronized speed is taken as the worst working point. The proposed method is applied to analyze the anti-demagnetization ability of a 22 kW prototype and a new structure of composite material rotor is proposed to effectively enhance the anti-demagnetization ability. The working point during the startup of an experimental prototype is measured by a designed real-time magnetic field measuring system, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: LSPMSM; synchronous motors; partial demagnetization; time-stepping finite element method; composite material bar

96