

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

李丹,刘冠芳,吉永红,郑瑞娟,刘熾.
PWM脉冲波对电机绕组时变特性影响研究.
电机与控制应用,2021,48(12):37.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

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



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

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

PWM 脉冲波对电机绕组时变特性影响研究

李 丹^{1,2}, 刘冠芳^{1,2}, 吉永红^{1,2}, 郑瑞娟^{1,2}, 刘 嫵^{1,2}

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

摘 要: 以变频电机定子绕组为研究对象, 分析变频器输出的脉宽调制(PWM)脉冲波频率、峰值、上升时间对电机绕组暂态电压分布特性的影响。研究结果显示, 频率的增加对电机损耗有直接影响, 进而通过损耗影响电压分布, 频率和损耗的增加对绕组对地电压与匝间电压幅值都有一定的抑制作用。随着尖峰系数的增大, 各线圈对地电压幅值都有所增加, 且最大对地电压幅值位置由靠近中性点转移至电机端。尖峰系数对匝间电压分布影响相对较小, 匝间电压的变化范围在 60~75 V 之间, 不同尖峰系数下匝间电压分布均匀。脉冲上升沿时间对电压分布影响较大, 随着脉冲上升沿时间的减少, 对地电压及匝间电压成线性增加。上升沿时间对匝间电压幅值及分布的均匀程度起着决定性的影响。

关键词: PWM 脉冲波; 变频电机; 暂态电压

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)12-0037-06

doi: 10.12177/emca.2021.125

Research on Influence of PWM Pulse Wave on Time-Varying Characteristics of Motor Windings

LI Dan^{1,2}, LIU Guanfang^{1,2}, JI Yonghong^{1,2}, ZHENG Ruijuan^{1,2}, LIU Yan^{1,2}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji 044502, China)

Abstract: Taking the stator winding of variable frequency motor as the research object, the effects of the frequency, peak value and rise time of the pulse width modulation (PWM) pulse wave output by converter on the transient voltage distribution characteristics of motor windings are analyzed. The results show that the increase of frequency has a direct impact on the motor loss, and then affects the voltage distribution through the loss. The increase of frequency and loss has a certain inhibitory effect on the amplitudes of voltage to ground and turn to turn voltage. With the increase of peak coefficient, the amplitude of voltage to ground of each coil increases, and the position of the maximum amplitude is transferred from near the neutral point to the motor end. The influence of the peak value on the turn to turn voltage distribution is relatively small. The variation range of the turn to turn voltage is 60~75 V, and the turn to turn voltage is evenly distributed under different peak coefficients. The rise time of the pulse has a great influence on the voltage distribution. With the decrease of the rise time of the pulse, the voltage to ground and turn to turn voltage increase linearly. Especially, the rise time has a decisive influence on the amplitude and the distribution uniformity of the turn to turn voltage.

Key words: PWM pulse wave; variable frequency motor; transient voltage

收稿日期: 2021-09-22; 收到修改稿日期: 2021-10-27

作者简介: 李 丹(1986—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机绝缘结构设计。

刘冠芳(1983—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电机绝缘结构设计。

0 引言

随着变频控制技术的发展,牵引系统及风电系统普遍采用脉宽调制(PWM)控制。PWM变频器控制具有上升沿陡峭、载波频率相对较高以及峰值电压较高等特点^[1-6]。这些特点在一定程度上增加了主绝缘局部放电的可能性,同时增大了匝间承受的压降,因此传统工频电源的绝缘结构设计理念显然已不适用于PWM控制的电机绕组绝缘设计。基于半导体器件低功耗、高工作频率、低谐波的发展要求,变频器输出的电压上升沿速率、频率及峰值电压也在原有的基础上不断增大,进一步提高了对电机绝缘结构的设计要求。同时随着电压脉冲上升沿速率的不断增大,电缆对电机端电压的影响也逐渐突出,电机端电压峰值最大可增加至原来的1.9~2倍^[7-10]。目前国内外对电机绕组对地电压分布特性有一定的研究,针对电压上升时间及电缆对电机电压分布影响的研究较多,尚未形成一致定论。电机端电压相关参数对电压分布的影响研究相对较少。因此研究PWM控制下的电机端电压对电机绕组电压分布影响成为行业内迫切需求。

本文以电机端电压各项参数对电机绕组暂态电压分布的影响为研究内容,以仿真分析作为研究手段,试验结果作为检测校核手段,分析不同参数下变频电机绕组电压分布特性,对变频电机绝缘结构设计具有一定的参考价值。

1 电压分布影响因素理论分析

以电机绕组单位长度为研究对象,在时域范围内计算出电压、电流变化规律。单位长度等效电路模型如图1所示。

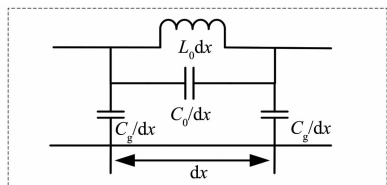


图1 单位长度等效电路模型

在脉冲上升沿输入电机绕组的瞬间,由于其等效上限频率无限大,此时电感可视为开路。假设绕组中导体的总长度为 l ,距离绕组导体首端为

x 处,匝间电容 C_0/dx 上的电压 du 和电流 i 的关系为

$$i = - \frac{C_0}{dx} \frac{\partial(du)}{\partial t} \quad (1)$$

电容 C_g/dx 上的电压 u 和电流 di 的关系为

$$di = - C_g dx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

综合式(1)、式(2)可得:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{C_g}{C_0} u \quad (3)$$

假设绕组末端(即中性点)接地时,边界条件为,当 $x=0$ 时, $u=U_0(t)$;当 $x=l$ 时, $u=0$ 。沿着绕组的电压 u 的解为

$$u = U_0(t) \frac{\text{sh}\gamma(l-x)}{\text{sh}\gamma l} \quad (4)$$

式中: $\gamma = \sqrt{C_g/C_0}$ 。

对式(4)两边 x 求微分,得沿绕组电位梯度的分布为

$$\frac{du}{dx} = - U_0(t) \gamma \frac{\text{ch}\gamma(l-x)}{\text{sh}\gamma l} \quad (5)$$

显然,从绕组首端到中性点的电位梯度绝对值逐渐减小,在绕组首端($x=0$)为最大,即为 $\gamma U(t) \coth \gamma l$,而在绕组末端($x=l$)为最小。

根据式(1)与式(5)可得出:

$$i = - C_0 \gamma \frac{\text{ch}\gamma(l-x)}{\text{sh}\gamma l} \frac{dU_0}{dt} \quad (6)$$

电流 i 经过对地电容 C_g 的分流作用,其从绕组的首端到中性点的绝对值也是逐渐减小的,在电压分布响应中,除了输入电压 $U_0(t)$ 值对电压分布特性有影响外,其值与绕组首端输入的电压随时间的变化率呈正相关。因此,绕组中电压上升沿速率直接影响绕组中电压分布与电流分布。本文以 $U_0(t)$ 、 $dU_0(t)/dt$ 及频率 f 为研究对象,对电机绕组电压分布影响分析。

2 电机绕组等效电路模型

绕组匝间与对地电容由电机绝缘结构材料介电属性、绝缘厚度、导体线规决定,与输入载荷无关。电感参数主要受电机绕组的结构、绕组材料磁导率、电压频率等因素影响。因此除了电机自身材料与结构特点对电感系数的影响外,重点考虑频率对电感系数的影响。等效电阻以铜导体集

肤效应的等效铜耗为主。

图2中匝电阻 R 、匝自感 L 、各匝间互感 M 、匝间电容 $C_{(n-1)-n}$ 和匝对地电容 C_n 等为电机绕组电路模型中主要参数。

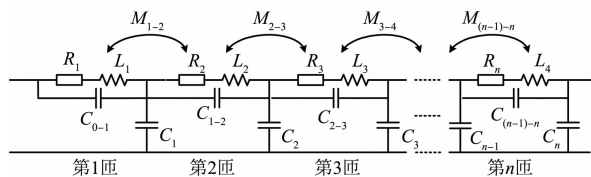


图2 线圈等效电路图

3 电机绕组时变特性仿真分析

PWM脉冲输入波形主要由峰值电压、直流总电压、频率、脉冲上升沿时间（脉冲上升沿速率）这4个因素决定。本文重点分析上升及下降沿处的峰值电压、上升沿时间及上升沿等效上限频率对电压分布的影响规律。为了探究PWM脉冲对电压分布的影响，本文以某型号560 kW/3 kV变频电机为研究对象，该电机直流母线电压 U_{dc} 为2.1 kV，电机额定频率为140 Hz，上升沿时间为3 μ s（根据试验采集的变频器输出波形进行提取）。

图3为典型上升沿冲击波形，其中 U_a 为稳态冲击电压， U_b 为尖峰电压，0~2.5 kV为冲击电压上升沿， U_b/U_a 为尖峰系数。

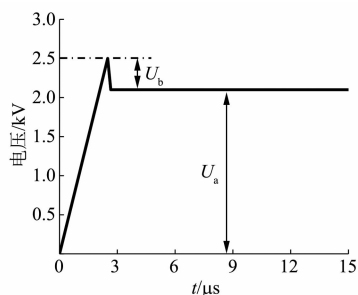


图3 上升沿冲击电压波形示意图

3.1 频率对电压分布的影响

3.1.1 损耗

电机绕组损耗主要包括：铜耗、铁耗、介质损耗，其中铜耗主要体现在集肤效应、铁耗包括涡流损耗与磁滞损耗^[11]。在铁心材料一定的情况下，铁心的磁滞损耗与涡流损耗都随着频率的增大而增加。介质损耗和频率成正比，因此高频下介质

损耗呈现增加趋势。本文考虑铜导体的电阻，即高频下铜耗对电机电压分布的影响。

高频下，磁导率随着频率的增加而减小。涡流损耗的去磁效应使中间磁场减弱，涡流分布趋于表面的集肤效应，导致涡流所经路径的交流电阻增大，电导率减小，因而涡流损耗比低频时有所减少。但是高频下的集肤效应明显，导致的铜耗较大，此处考虑集肤效应对电路参数的影响。感应电流会阻碍磁场在导体中的透入深度，只允许磁场穿透一定的深度，这种效应叫做集肤效应，这个深度称为透入深度，表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (7)$$

式中： ω 为激励角频率； μ_0 为真空中的磁导率； μ_r 为导体的相对磁导率； σ 为导体的电导率。

随着频率的增加，透入深度减小，且集肤效应导致的铜耗增加，绕组中的等效电阻增大。考虑集肤效应的影响，等效电阻值为

$$R = \frac{l}{A \delta \sigma_{Cu}} \quad (8)$$

式中： l 为线圈长度； A 为线圈截面面积； δ 为透入深度； σ_{Cu} 为铜导体电导率。

由于空气介质磁导率不受频率的影响，端部等效电阻值受频率影响较小，高频下此处等效阻值只考虑铁心处铜导体等效阻值。

3.1.2 电感系数

频率增大，磁场在铁心中的透入深度减小，导体周围磁场的分布改变，最终计算得到的电感值减小。通过磁场计算每匝导体的自感，而相邻匝导体的互感也不能忽略，可以通过公式 $M = k \sqrt{L_1 L_2}$ 得到相邻导体之间的互感值，并且最终平均分配到每匝导体上。其中， k 范围为0.8~0.9，这里取 $k=0.8$ 。

表1 不同频率下电机绕组参数

频率	1 kHz	10 kHz	0.1 MHz	1 MHz
透入深度/mm	2.09	0.66	0.21	0.067
等效阻值/ Ω	0.658	2.08	6.54	20.51
电感系数/ μ H	22.2	15.3	12.2	11.05

3.1.3 电压分布

通过对不同频率下电机绕组集肤效应透入深

度、等效阻值及电感系数的计算,得出各频率下的相应参数,并计算不同参数下的电压分布,得出绕组线圈对地电压分布曲线图与首支线圈不同匝间电压分布图,如图4所示。

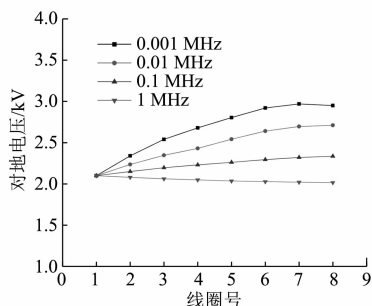


图4 不同频率下各线圈电压分布曲线图

图5中,随着频率的增加,电感系数逐渐减小,损耗的增加,使得等效阻值增大,各线圈对地电压幅值逐渐减小,各线圈对地电压幅值分布均匀性程度较好,最大对地电压幅值由靠近电机绕组中性点位置转移到电机端。因此,频率的增大在一定程度上减小了电压幅值,减小了电感产生的反电动势,进而减小了绕组线圈振荡幅值。

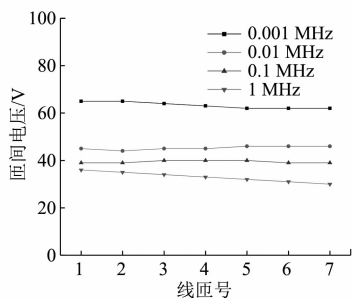


图5 不同频率下首支线圈各匝间电压分布曲线图

随着频率的增大、电磁振荡阻尼的不断增加及电感系数的减小、匝间电压逐渐减小,且不同频率下的匝间电压分布相对较为均匀,说明频率对电机绕组匝间电压分布的均匀性几乎没有影响。

3.2 峰值电压对电压分布的影响

在变频器绝缘栅双极型晶体管(IGBT)关断瞬间,PWM波形会在控制电压基础上产生一个脉冲峰值,该峰值电压最高可达到母线电压的1倍以上,定义尖峰系数为100%。因此,PWM峰值电压对电压分布的影响不可忽略。在计算不同峰值电压时,中间直流母线电压不变,值为2.1 kV。

图6中曲线是指不同尖峰系数下各线圈对地电压幅值的分布,其中线圈对地电压为U相线圈首端对地电压幅值,匝间电压为U相首支线圈每匝匝间电压幅值。由图6可知,随着峰值电压的增大,线圈整体电压值都有不同程度的提升,线圈最大对地电压值由靠近中性点位置转移至首支线圈,且随着峰值电压的增大,线圈最大对地电压位置点变为整体线圈中最低电压幅值点。因此在线圈对地电压峰值增大至50%及以上时,此时最大对地电压值为首支线圈的峰值电压值。

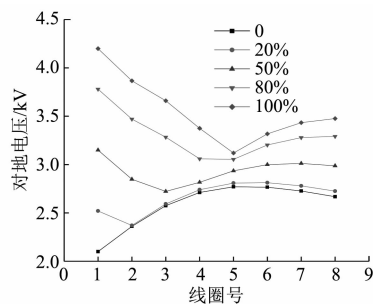


图6 不同尖峰系数下各线圈电压分布曲线图

图7为不同峰值电压下的匝间电压幅值变化趋势。因为该电压分布计算的输入上升沿时间为 $3\mu s$,所以匝间电压分布相对均匀,匝间电压幅值较小。增大电压峰值在一定程度上增加了匝间电压幅值,但是增加幅度较小。在峰值电压达到80%的母线电压时,匝间电压稍有增加的趋势,但是最大增幅为10%左右,匝间电压幅值数量级上没有根本的变化。在峰值电压增大的状态下,最大匝间电压幅值略有增加,且电压分布均匀度不受峰值电压影响,匝间电压分布均匀性在不同峰值电压下基本保持一致。因此峰值电压对对地电压分布有较大影响,对匝间影响相对较小。

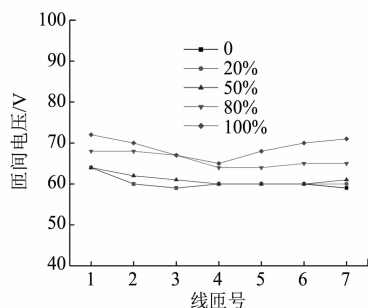


图7 不同尖峰系数下首支线圈各匝间电压分布曲线图

3.3 上升沿时间对电压分布的影响

在不同上升沿时间下,电缆对电压分布也存在直接的影响。随着上升沿时间的缩短,电机端首支线圈峰值电压在一定范围内呈线性增加的趋势,最高可增加至2倍左右。为了更加直观地分析电压上升沿时间对电机绕组电压分布的影响,此处忽略电缆对电压分布的影响,只分析上升沿时间对电压分布的影响。

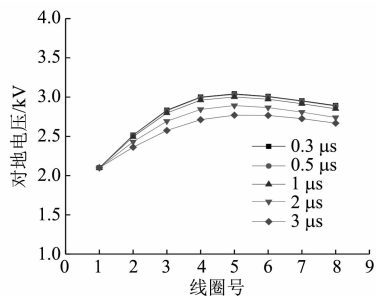


图8 不同上升沿时间下各线圈电压分布曲线图

图8中,通过计算不同上升沿时间对电压分布的影响结果可以看出,在输入端峰值电压不变的前提下,随着脉冲上升沿时间的缩短,各线圈的电压幅值分布规律基本一致,各线圈对地电压幅值有所增加。在1、2、3 μs 范围内,各支线圈对地电压幅值的增加幅度在100~130 V之间;当上升时间减小至1 μs 后,随着上升沿时间的缩短,电机各支线圈对地电压幅值增量降至10~30 V。在当电机上升沿时间缩短至1 μs 后,随着电压脉冲上升沿时间的缩短,绕组线圈对地电压幅值增量较小。电压上升沿时间对电压峰值有所影响,相比于匝间电压,此影响较小。

由图9可以看出随着上升沿时间的缩短,首匝线圈匝间电压幅值呈直线增加的趋势,且电压分布不均匀性逐渐明显。在1 μs 及以下上升沿时间下,匝间电压分布均匀性较好;当上升沿时间由2 μs 缩短至1 μs 时,首匝匝间电压幅值增加1倍,各匝电压分布一致性较好;当1 μs 缩短至0.5 μs 时,首匝电压幅值增加将近1倍,且电压分布不均匀性开始突出,首匝幅值变化最大;当上升沿时间有0.5 μs 缩短至0.3 μs 时,首匝幅值增大17%,电压分布不均匀程度增加;随着上升沿时间的缩短,首匝匝间电压增幅为30%、100%、80%、17%,因此随着电压上升沿时间的缩短,首匝匝间

电压不断增加,幅值增量也逐渐增加,当增量达到100%,开始降低,但不均匀程度逐渐明显。

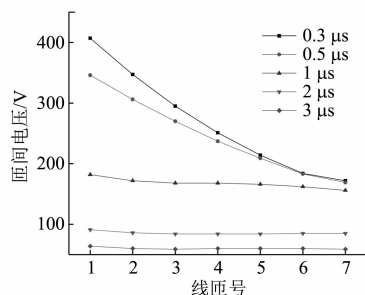


图9 不同上升沿时间下首支线圈各匝间电压分布曲线图

4 电机绕组电压分布测试

电机绕组电压波形测试试验电机与仿真分析采用同一机型。电压型变频器作为电源,在电机空载运行时对电机绕组进行电压波形采集。变频器输出的陡峭上升沿时间约为3 μs ,额定频率为140 Hz,峰值电压为2.5 kV,稳定电压为2.1 kV。图10~图14为试验与仿真分析波形图。

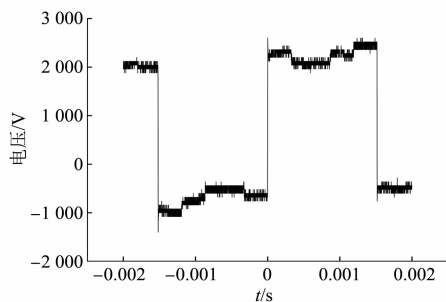


图10 电机端输入电压试验波形

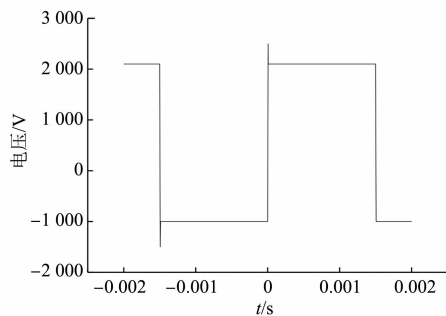


图11 仿真分析输入电压波形

图14为试验结果与仿真结果实测图,可以看出两种手段得出的结果基本吻合,且误差不超过10%,因此仿真分析的精度可满足电机绕组电压

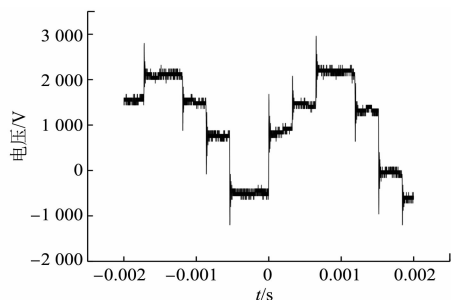


图 12 绕组线圈最大对地电压试验波形

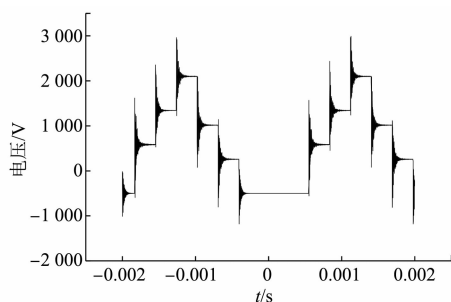


图 13 绕组线圈最大对地电压仿真波形

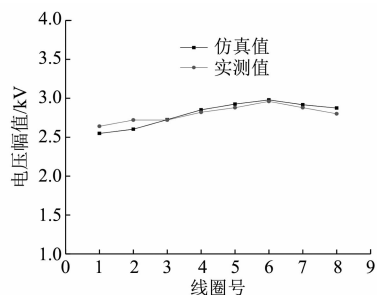


图 14 电机绕组线圈实测与仿真电压

分布计算分析需求。

5 结 语

本文以一种变频电机作为研究对象,建立电机绕组等效电路模型,在时域范围内计算电机电压暂态分布。通过计算不同参数下的电压分布特性得出以下结论。

(1) 电机输入脉冲频率的升高导致损耗增加,对电机绕组电压脉冲振荡阻尼作用加强;电感系数随之减小,产生的感应电动势降低,绕组脉冲振荡幅度及持续时间减小。因此损耗的增加以及电感系数的减小,在一定程度上降低了电压振荡幅值及振荡时间。

(2) 当电机端输入脉冲的尖峰系数增大至 50% 时,即峰值电压是稳态电压的 1.5 倍,电机绕组线圈最大对地电压位置开始由靠近中性点转移至电机端首支线圈;随着尖峰系数的增大,电机绕组线圈对地电压整体增加,当尖峰系数增至 80% 时,原始最大电压位置变为最低对地电压位置。受首支线圈过电压的影响,前 3~4 支线圈对地电压较大;随着尖峰系数的增大,匝间电压在 65~75 V 范围内有一定的上浮,峰值电压整体对匝间电压影响较小,且对其分布的均匀性没有太大影响。

(3) 随着上升沿时间的降低,各匝匝间电压随之增大,且不均匀度也在增加;首匝匝间电压增加幅度随着上升沿速率的增加而增大,增加到一定程度开始降低;在上升沿时间高于 1 μs 时,匝间电压分布较为均匀,在上升沿时间低于 1 μs 时,电压不均匀度逐渐明显。上升沿时间对各线圈对地电压的影响较小,增加幅度在 10~30 V 之间。

【参 考 文 献】

- [1] 秦钰,何山,董宁,等. 风力发电机绕组分布参数对过电压分布影响研究[J]. 微电机, 2021, 54(9): 13.
- [2] 朱文婷,何山,汪洋,等. 高频脉冲波作用下永磁风力发电机机端过电压分析[J]. 电子世界, 2019(14): 45.
- [3] 何聪,李军浩,张芊,等. 过电压下电气设备局部放电特性研究现状[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 9.
- [4] 骆华志,钟振坤. 600 MW 发电机定子故障的分析与研究[J]. 电工技术, 2018(21): 92.
- [5] 曹开江,吴广宁,罗杨,等. 高频脉冲下牵引电机绝缘的局部放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1376.
- [6] 高宗宝,吴广宁,江建明,等. 大型水轮发电机组定子接地故障分析研究[J]. 电气应用, 2017, 36(23): 46.
- [7] 佟来生,吴广宁,林同光,等. 变频牵引电机定子绕组内部电压分布特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 134.
- [8] WHEELER J C G. Effects of converter pulses on the electrical insulation in low and medium voltage motors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(2): 22.

(下转第 53 页)

对 MC 的轴系偏差问题和补偿特性进行了深入的研究。结论如下:随着径向偏差距离的增加,气隙磁场和导体盘涡流分布整体沿轴心径向移动方向偏移,MC 转矩总体呈下降趋势;随着角向偏差的增加,气隙磁场和涡流密度呈非对称分布,且出现明显的不平衡轴向磁拉力,但是输出转矩先下降然后平稳上升。轴系偏差对转矩脉动的影响不大,转矩脉动在 2% 以下,且角向偏差对转矩脉动影响大于径向偏差的情况。

【参考文献】

- [1] LUBIN T, REZZOUG A. 3-D analytical model for axial-flux eddy-current couplings and brakes under steady-state conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 8203712.
- [2] YANG X W, LIU Y G, WANG L. Nonlinear modeling of transmission performance for permanent magnet eddy current coupler [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 2098725.
- [3] ZHANG H X, WANG D Z, WANG X Y, et al. Equivalent circuit model of eddy current device [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (5): 8001009.
- [4] ZHU J H. Experimental research on energy-saving application of permanent magnet speed regulation technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 694: 242.
- [5] 吴明, 马玉顺, 匡俊, 等. 盘式永磁调速器在离心负载下的调速性能 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (14): 225.
- [6] 杨超君, 袁爱仁, 陈子清, 等. 盘式实心异步磁力耦合器的机械特性与调速特性 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 110.
- [7] CANOVA A, VUSINI B. Analytical modeling of rotating eddy-current couplers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 24.
- [8] WANG J, LIN H, FANG S, et al. A general analytical model of permanent magnet eddy current couplings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 50(1): 8000109.
- [9] MOHAMMADI S, MIRSALIM M, VAEZ-ZADEH S. Nonlinear modeling of eddy-current couplers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (1): 224.
- [10] LI Z, WANG D Z, ZHENG D, et al. Analytical modeling and analysis of magnetic field and torque for novel axial flux eddy current couplers with PM excitation [J]. AIP Advances, 2017, 7(10): 105303.
- [11] CANOVA A, FRESCHI F. Multiobjective design optimization and Pareto front analysis of a radial eddy current coupler [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 32(4): 219.
- [12] 李全文. 新型耐高温涡流式双层实心转子磁力联轴器的设计与优化 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [13] 崔箫. 永磁调速器的设计及相关性能分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [14] ZHU Z N, LAI L J, PAN Y. Optimal design of permanent magnetic coupling with high torque transmission and low eddy-current loss [C] // 2017 2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering, 2017.
- [15] WALLACE A, WOHLGEMUTH C, LAMB K. A high efficiency, alignment and vibration tolerant, coupler using high energy-product permanent magnets [C] // Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives, 1995.

(上接第 42 页)

- [9] 万健如, 林志强, 禹华军. 高频 PWM 脉冲波传输引起电机端子过电压的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 43.
- [10] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393.
- [11] 汤蕴璆. 电机学 [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.