

变频器电压切换对变频电机绕组的影响

刘东

(中冶京诚工程技术有限公司 电气与自动化工程技术所,北京 100176)

摘要:针对变频电机定子绕组绝缘和电压振荡问题,分析了变频器输出的脉冲电压在定子绕组、变频电缆、电抗器等传输路径中的过渡过程,推导了定子绕组线匝、输出电抗器、变频电缆的电压等效数学模型,建立了Simulink仿真模型并进行仿真。以冶金行业轧机类典型负载为例,采用大功率变频电机和变频器进行脉冲电压测试,验证了不同线匝电压斜率的变化。针对不同变频电缆引发的电压振荡,采用二阶最优拟合方法,分析了电压频谱特征,验证了电抗器对电压振荡的抑制效果。

关键词:电压斜率 du/dt ;匝间绝缘;电压振荡;变频器;变频电机

中图分类号: TM343 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24734

Influence of Inverter Voltage Switching on Windings of Variable Frequency Motor

LIU Dong

(Electric Depart, Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: Focus on the stator winding insulation and voltage oscillation of variable frequency motor, the transition process of the pulse voltage output by the frequency converter in the transmission path of stator windings, frequency conversion cables, reactors, etc was analyzed, the voltage equivalent mathematical models for stator winding turns, output reactors, and variable frequency cables were derived, and a Simulink simulation model was established and simulated. Taking typical loads of rolling mills in the metallurgical industry as an example, pulse voltage tests were conducted using high-power variable frequency motors and frequency converters to verify the changes in voltage slopes of different wire turns. For the voltage oscillation caused by different frequency conversion cables, the 2nd-order system fitting was used to analyze the voltage spectrum characteristics, and the reactor's suppression effect for voltage oscillation was also verified.

Key words: voltage slope du/dt ; turn-insulating; voltage oscillation; inverter; variable frequency motor

随着电力电子功率器件技术的发展,大功率IGBT元器件广泛应用于冶金、石化等频繁调速的工业场合,特别是130 kW以上的低压大功率变频器的推广和应用越来越广泛。在冶金、石化等流程行业,对变频器产品的可靠性、稳定性、快速维护性提出了更高的要求,同时也对变频电机的电气绝缘、电压冲击、电流冲击、力矩冲击、机械振动等方面提出了更高的要求。在变频驱动领域中,电机定子绝缘失效引发的现场事故巨大,造成了大量的经济损失,已经成为了行业技术发展的痛点。由于没有太多技术指导,很多技术维护人员无法准确定位故障原因,只能将电机返厂维修。

国外一些文献认为电压斜率影响电机定子

绝缘,提出了 du/dt 滤波器的结构来解决此类问题。文献[1]提出了经典的低通滤波器设计方法,但是大电流增加了系统功率损耗,不适于工业领域大功率变频驱动场合;文献[2]提出了RCL二阶滤波器设计,对于变频电机、变频电缆、输出电抗器等器件提出了苛刻的要求,在实际工程应用中无法实施。国内一些学者针对正弦波伺服驱动器进行了相关的技术研究,文献[3]提出了一种正弦波输出滤波器来降低电机电压斜率 du/dt ,在一些小功率伺服驱动领域得到应用,但无法适用于大功率变频驱动场合。

针对变频电机定子电压斜率 du/dt 、电压振荡等技术问题,本文建立了电机定子线匝数学模型,

基金项目:国家自然科学基金(2020IM020500)

作者简介:刘东(1984—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为冶金电气传动及自动化技术、实时多任务系统技术、现场总线及实时以太网技术,Email:liudong@ceri.com.cn

搭建了Simulink仿真模型,并进行了多项Matlab仿真测试,研究不同线匝之间电压过渡过程。同时,在实验室环境下,采用大功率变频电机进行实际测试和验证。

1 变频电机经典模型

传统理论认为电机定子绕组是一个整体,等效为定子电阻、定子漏感,主要研究方向是定子电压和定子电流的关系,是一种稳态运行点的研

究。而对于变频电机定子绕组来说,它通过电缆和电抗器与变频器IGBT功率器件相连,一直承受着IGBT开通与关断瞬间的电压冲击。变频器与变频电机连接关系图如图1所示。对于冶金行业的大功率变频电机来说,变频器的载波频率在1~8 kHz,电压脉冲频谱范围是1~200 kHz。传统的理论无法满足变频电机定子绕组的研究,需要研究脉冲电压在定子绕组之间传输的过程,特别是高频特性对电机绝缘的影响。

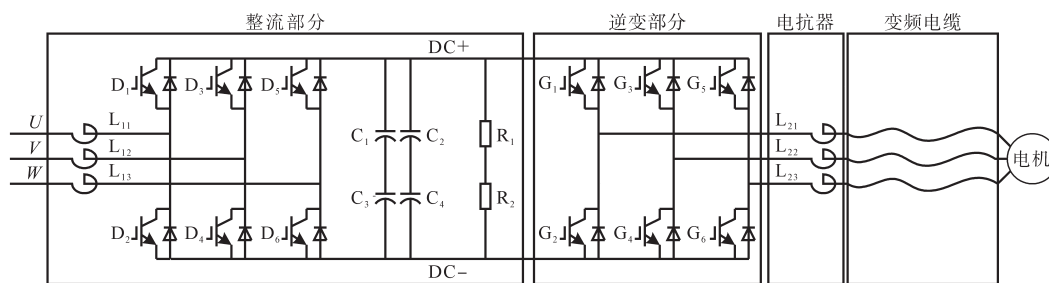


图1 变频器与变频电机连接关系图

Fig.1 Connection diagram between frequency converter and variable frequency motor

交-直-交变频器将外部交流电压整流为直流电压,给内部电容充电,形成稳定的直流电压源;再通过快速IGBT的开通与关断输出脉冲交流电压,经过变频电机绕组后形成交流电流,驱动电机旋转。由图2中电机等效电路可以看出,变频电机定子绕组的等效电阻非常小,主要体现在等效电感分量,同时在电机转子旋转时还承受了转子产生的反电势电压。



图2 电机等效电路图

Fig.2 Diagram of motor equivalent circuit

在变频器工作的瞬间,由于IGBT开通输出了一个矩形方波电压到电机定子绕组,受到变频电缆、输出电抗器、定子绕组等效电阻、电抗的影响^[4~6],矩形方波电压到达电机定子绕组侧时,电压上升率会大幅减小,如图3所示,从而呈现出梯形波电压,该电压变化率被称为电压斜率 du/dt 。

有一种看法认为^[7~10],变频器输出方波电压经

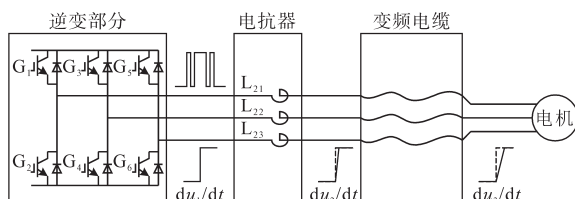


图3 电压斜率变化图

Fig.3 du/dt variation diagram

过变频电缆、电机定子绕组后,以电波的形式进行传播,并且由电缆反射回变频器,形成了振荡包,如图4所示。当电缆反射频率大于2 MHz的情况下,电机定子侧的电压斜率甚至会大于变频器输出侧的电压斜率,这对变频电机定子绕组的绝缘构成了巨大的威胁^[11~12],因此对定子绕组的绝缘提出了更高的要求。

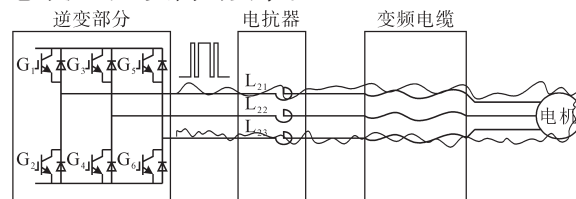


图4 电缆反射示意图

Fig.4 Cable reflection diagram

当电缆反射导致电压斜率增大时,电机定子绕组内部不同线匝之间的瞬时电压也会增大或减小,这与变频电机设计、制造工艺有关。通常情况下,电机定子绕组等效电感较大,对于激励电压呈现出强有力的衰减作用。因此,当较高电压斜率的脉冲电压输入到电机定子后,在电机定子内部只需经过少数几个线匝后,电压斜率迅速下降,不再对绕组绝缘构成威胁。电压斜率 du/dt 只影响变频电机定子输入、输出端部的绝缘,对电机定子绕组匝间绝缘没有任何影响。

2 定子匝间电压模型

从变频电机制造工艺来分析,电机定子绕组

是由绝缘线按照一定绕制规则在定子线槽中多次绕制而成。定子线匝等效电容示意图如图5所示。

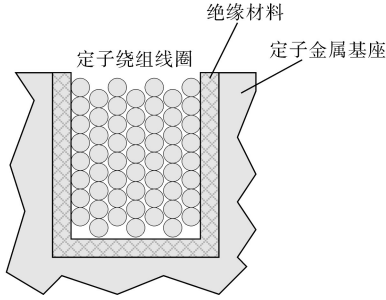


图5 定子线匝等效电容示意图

Fig.5 Schematic diagram of equivalent capacitance of stator winding

从图5中可以明显看出,以线匝表面绝缘材料为电介质,线圈相对于地电位具有电容器的典型结构,即2个导电面由薄电介质彼此隔开。

对电机定子绕组的各匝线圈进行建模,在电机生产制作过程中,受到线缆内阻、等效电感、定子导槽绝缘漆的影响,每个线匝对地具有微弱的等效杂散电容,可以将每个线匝等效为一个二阶低通滤波器,如图6所示,输入的脉冲电压经过电机定子输入端线匝后,依次串联传输到每个线匝,在输出端表现出较为明显的时间滞后。

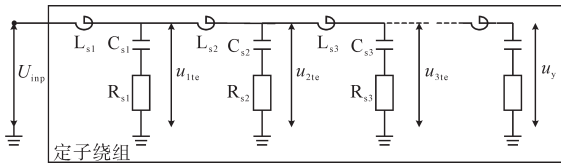


图6 电机定子线匝等效图

Fig.6 Equivalent diagram of motor stator winding

在生产过程中,定子绕组采用同一批次的绝缘线缆,绕制之后的每个线匝长度相等,等效电感 L 相等。由于每个线匝对地等效电容、电阻都非常小,每个线匝对地电阻 R 可以近似看做是相等的,可以进一步简化电机定子绕组的数学模型。当定子绕组绝缘完好时,每个线匝对地电容分布基本一致,对地电容简化为相等的 C 。按照电机定子绕组的连接顺序,建立定子线匝等效阻抗拓扑如图7所示。

从最后一个线匝的阻抗分析开始,线匝对地

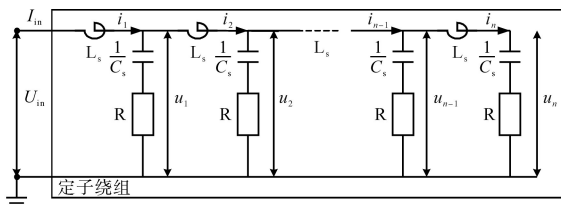


图7 定子线匝等效阻抗图

Fig.7 Equivalent impedance diagram of stator winding

电压为 u_n ,流过线匝的电流为 i_n ,线匝的阻抗为 Z_n ,表达式如下:

$$Z_n = u_n / i_n = R + 1 / (Cs) \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯算子。

倒数第2个线匝的阻抗 Z_{n-1} 是最后一个线匝电抗 Z_n 与本线匝对地电容和电阻的并联结果:

$$Z_{n-1} = \frac{1}{1/Z_n + 1/(Z_n + Ls)} \quad (2)$$

以此类推,可以求解出每个线匝的阻抗 Z_i :

$$Z_{n-2} = \frac{1}{1/Z_n + 1/(Z_{n-1} + Ls)} \quad (3)$$

$$Z_1 = \frac{1}{1/Z_n + 1/(Z_2 + Ls)} \quad (4)$$

$$Z_0 = u_{in} / i_{in} = Z_1 + Ls \quad (5)$$

由上述公式可以看出,对于1个具有 n 匝线圈的定子绕组来说,电压电流模型是一个 n 阶系统,可以用标准的分式来表示:

$$Z_s = \frac{d_n s^n + \dots + d_1 s + 1}{c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0} \quad (6)$$

采用线匝绕组等效模型,在Matlab中建立电机定子绕组模型,仿真框图如图8所示,每个线匝采用相同的电感、电阻、电容参数,测量脉冲输入电压、每个线匝的电压。线匝对地电压激励过程如图9所示。

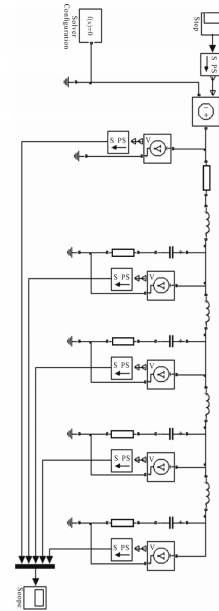


图8 定子线匝仿真框图

Fig.8 Simulation block diagram of stator winding

从图9中可以看出,电机定子绕组输入侧第1线匝处的电压斜率最大,随着电压在定子绕组中的传输,电压斜率随着线匝的增加而逐步递减。对于每个线匝来说,只有线匝两端的电压差

会影响到线缆绝缘。线匝电压差如图10所示。

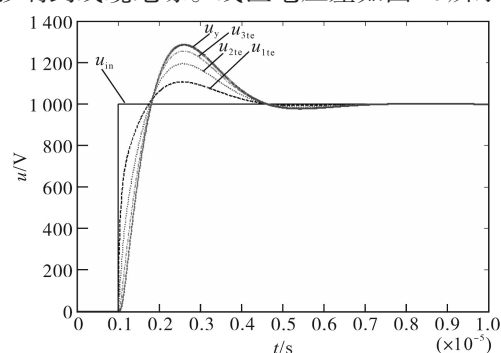


图9 线匝对地电压激励过程

Fig.9 Voltage excitation process between line and ground

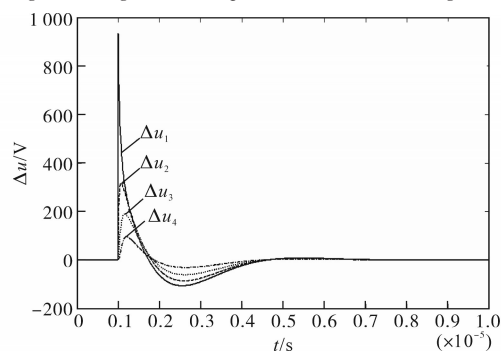


图10 线匝电压差

Fig.10 Voltage difference among stator lines

从图10中可以看出,每个线匝的电压逐步进入稳态,相邻的2个线匝之间的电压差随着时间逐步减小;而从输入侧线匝到输出侧线匝,线匝电压差的峰值也呈现出减小的趋势。绝大部分的变频电机都采用错序绕制,电机定子输入端的第一个线圈与输出端最后一个线圈的电压差最大,电压斜率也最大,甚至超过输入的脉冲电压斜率。对于个别变频电机绕线方式,如果电机定子绕组的最后一个线圈经过绕制后,回到了第一个线圈的物理位置,这时的电压差最大,电压斜率也最大。当电压差低于定子绕组绝缘强度,理论上任何大小的电压斜率都不会损坏线匝绝缘。只有定子绕组的第1匝和最后1匝承受了最大的电压斜率和线匝电压差,这也是变频电机绝缘失效的最大风险点。因此可以推理得出如下结论:如果变频电机内部线匝绝缘失效,而端部线匝绝缘没有失效,那么变频电机失效的原因不是电压斜率和线匝电压差,而是由线匝自身破损、导电粉尘、潮湿、外部受力等其他环境因素导致的电机定子绝缘失效。

在实际工程中,由于变频电缆、输出电抗器等等效电阻的影响,在电机端和变频器输出端都会产生电压发射现象,如图11所示。变频器输出的

方波电压会在变频器与电机端之间的电缆上形成行波,出现电压振荡过程,振荡的频率与电缆长度有关。由于每个定子线匝的等效电感、等效对地电容、等效对地电阻等核心参数基本一致,因此每个定子线匝的电压振荡周期基本一致;受到线匝等效电感的影响,不同线匝的电压存在一定的周期滞后;每个线匝的电压振荡幅值不同。

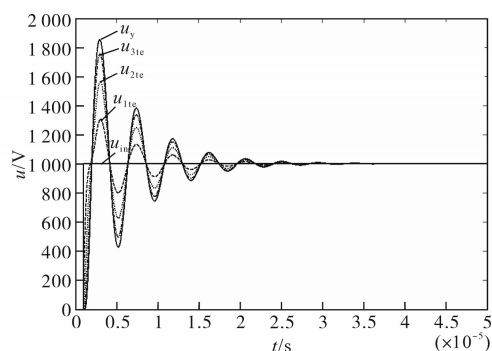


图11 电压振荡过程图

Fig.11 Voltage oscillation process diagram

变频器输出电抗器可以改变等效电路参数,从而破坏电压振荡过程,可以有效降低电压斜率。对于中心频率在0.2~3 MHz之间的电压振荡,可以通过增加10~50 μH的输出电抗器来有效抑制。特别是对于中性点接可调电阻、构成二阶低通滤波器的电抗器来说,工程效果非常明显。

基于变频电机定子线匝二阶模型,本文在Matlab中建立了UV相定子模型,如图12所示。采用7段调制波技术,变频器在任意时刻总是改变1对IGBT的开关状态,本文研究UV相开通瞬

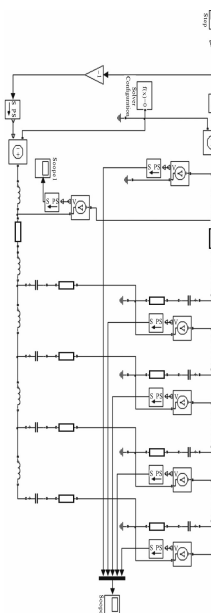


图12 变频器输出电抗器仿真框图

Fig.12 Simulation block diagram of inverter with reactor

间加入1 000 V阶跃电压后的过渡过程,变频器输出侧加入了50 μH 三相电抗器,测量UV相之间的电压变化过程,如图13所示。

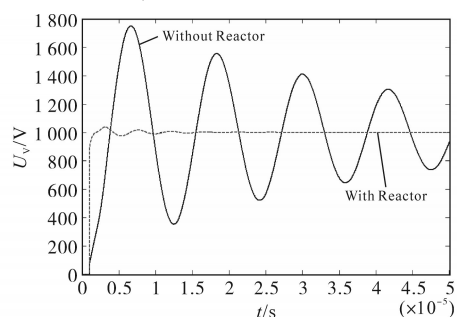


图13 输出电抗器抑制电机振荡电压

Fig.13 Voltage oscillation suppression for electrical motor with output reactor

从图13中可以看出,在1 μs 时刻,给变频电机加入1 000 V阶跃激励电压后,在电机定子UV相之间的实际电压加入50 μH 电抗器后,电压波动幅值明显小于没有加入电抗器,从而验证了电抗器对于定子绕组振荡电压的抑制作用。对于冶金行业棒线材轧机功率范围在200~3 000 kW之间,大功率变频器通常配置输出电抗器来抑制电压波动,降低电压斜率。但是由于工程现场变频器所在电气室与现场变频电机之间的距离变化较大,变频电缆长度在50~300 m之间,电缆线径也有不同,根据驱动电流的大小,现场会出现部分电机端部电压振荡。上述仿真实验给出了理论推导和仿真数据,而实际工程现场中通过调整输出电抗器抽头或者增加中性点电阻的方式来进一步抑制电压振荡。

3 工程现场测试

进一步研究电压斜率、线匝电压差对冶金行业大功率变频电机的影响,本文通过大功率对拖试验平台开展详细的测试和研究。试验采用上海南洋电机厂变频器电机YTSP450L4-6,额定电压690 V,额定电流530 A,额定功率500 kW,额定频率50 Hz,额定转速980 r/min,电机极对数3对,无输出电抗器,变频电缆长约50 m。示波器采用安捷伦DSO6012A,采样速率为2 GSa/s,单通道100 MHz。电压检测采用高压差分离探头,最高采集交流电压为2 400 V。测试环境如图14所示。

变频器载波频率为1.5 kHz,死区时间为5 μs ,脉冲电压宽度为1~600 μs 。变频器输出25 Hz三相正弦电压,电机转速稳定在490 r/min后,测

量电机UV相电压,如图15所示。

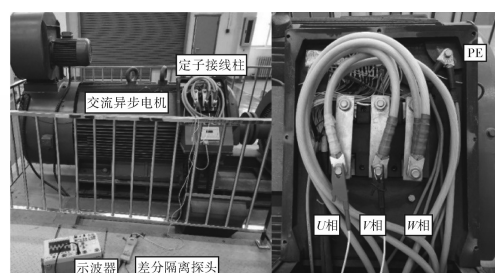


图14 实验测试环境

Fig.14 Experimental environment

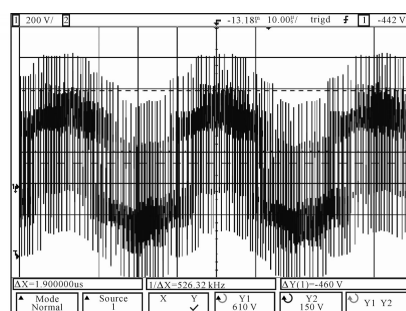


图15 电机定子绕组电压

Fig.15 Voltage of stator windings

观察电压振荡的过渡过程,振荡电压峰峰值 U_{pp} 为1.14 kV,振荡周期为3.6 μs ,如图16所示,振荡电压频谱如图17所示。

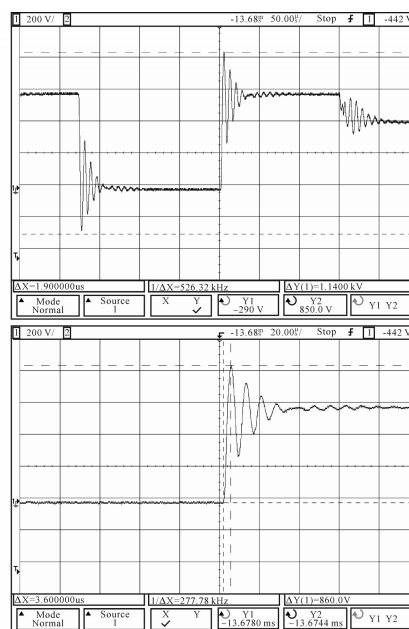


图16 振荡电压过渡过程

Fig.16 Oscillating voltage transient process

为了研究电压振荡过程,本文将示波器数据导出,并进行标么化处理,如图18所示。利用经典控制理论进行分析和辨识,提取关键的系统等效参数。

采用Matlab二阶系统最优拟合方法,对上述

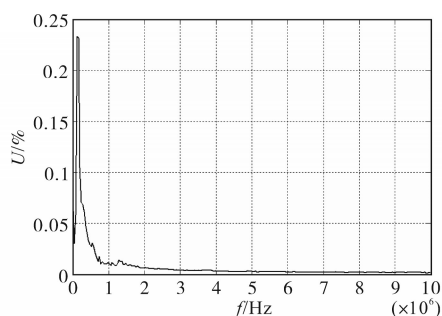


图17 振荡电压频谱图

Fig.17 Voltage frequency spectrum

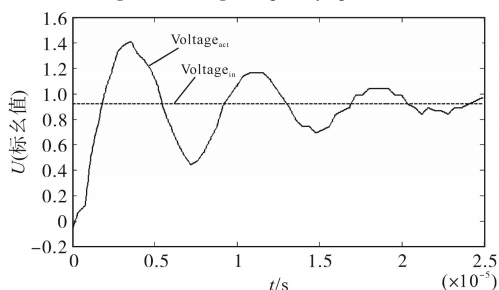


图18 电压标么化

Fig.18 Standardization of voltage

阶跃响应过程进行系统辨识,得到辨识的结果如图19所示。从而得到本系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.9734}{1.38 \times 10^{-12} s^2 + 3.225 \times 10^{-7} s + 1} \quad (7)$$

该电机定子绕组电压系统响应的波特图如图20所示,截止频率为200 kHz。

该截止频率与IGBT元器件的开关特性有关,是大功率变频器产品设计的重要指标之一,

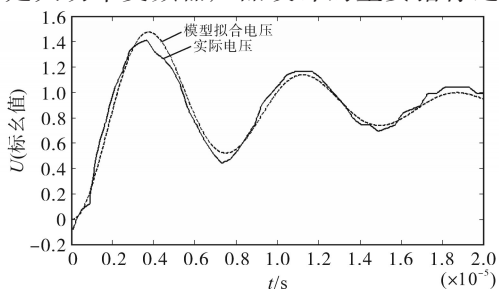


图19 振荡电压拟合效果图

Fig.19 Diagram of oscillation voltage fitting

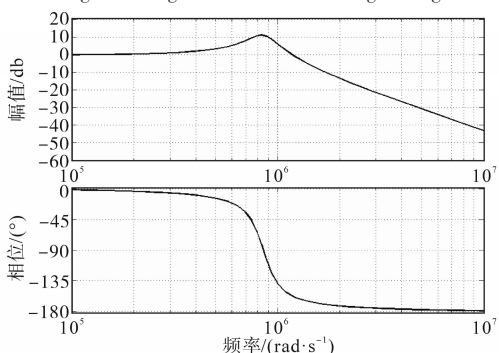


图20 电机定子绕组电压波特图

Fig.20 Voltage Bode diagram of motor stator winding

决定了IGBT开关损耗功率。减少电压振荡幅值和频率可以有效降低变频器的开关损耗,有利于延长IGBT元器件寿命。将50 μH电抗器加入到变频器输出侧,然后再经过变频电缆连接到变频电机,电压振荡消失,说明输出电抗器对于电压振荡的抑制效果良好,如图21所示。

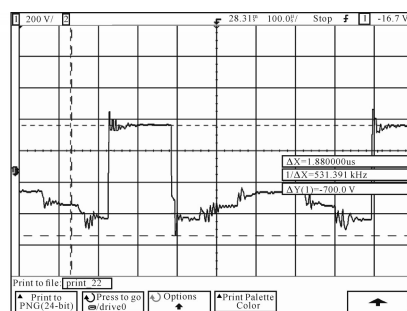


图21 加入电抗器后电机定子绕组电压

Fig.21 Voltage of motor stator winding with reactor

4 结论

针对变频电机定子绕组绝缘问题,本文详细分析了变频器输出的脉冲电压在传输路径中的过渡过程,推导了定子绕组线匝、输出电抗器、变频电缆的电压等效数学模型,建立了Simulink仿真模型并进行了仿真。以冶金行业轧机类典型负载为例,采用大功率变频电机和变频器进行脉冲电压测试,验证了不同线匝电压斜率的变化。针对不同变频电缆引发的电压振荡,本文进行了二阶系统最优拟合,分析了电压频谱特征,也验证了电抗器对电压振荡的抑制效果。

参考文献

- [1] 曹璞璘,范浩然,王登,等. 基于无源滤波器设计理论的半波长输电线路调谐电路特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(20):6979-6988.
CAO Pulin, FAN Haoran, WANG Deng, et al. Discussion on characteristics of compensation circuits for tuned half-wave-length transmission lines based on filter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6979-6988.
- [2] 蔡雨希,何英杰,陈涛,等. 基于粒子群的三电平并网逆变器LCL滤波参数的高效精确设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(20):6663-6673.
CAI Yuxi, HE Yingjie, CHEN Tao, et al. Efficient and accurate design method of LCL filter for three-level grid-connected inverter based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6663-6673.
- [3] STROM J P, TYSTER J. Active du/dt filtering for variable-speed AC drives[C]//2009 EPE' 09. 13th European Conference on

(下转第92页)

- YUAN Yulong. Research on model predictive direct power control of brushless doubly-fed generator[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.
- [2] 杨旭. 电网电压不平衡下双馈风力发电机的模型预测控制[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- YANG Xu. Model predictive control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [3] ZHANG Zhenbin, CUI Zhufeng, ZHANG Zhenkun, et al. Advanced control strategies for back-to-back power converter PMSG wind turbine systems[C]//2019 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), Quanzhou China: IEEE, 2019: 1-6.
- [4] ZHANG Zhenbin. On control of grid-tied back-to-back power converters and PMSG wind turbine systems[D]. Munich: Technical University of Munich, 2016.
- [5] 张瑞林, 卢子广, 甘霖, 等. 感应电机无权重系数模型预测转矩控制[J]. 电气传动, 2020, 50(10): 102-106.
- ZHANG Ruilin, LU Ziguang, GAN Lin, et al. Model predictive torque control of induction motor without weighting factor[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 102-106.
- [6] 付宗见, 马国峰, 姚存治. 基于遗传算法的T型三电平并网逆变器预测控制研究[J]. 电子器件, 2020, 43(5): 1042-1045, 1077.
- FU Zongjian, MA Guofeng, YAO Cunzhi. Predictive control of T-type three-level grid-connected inverter based on genetic algorithms[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020, 43(5): 1042-1045, 1077.
- [7] 马红如. 双三相永磁同步电机有限集模型预测转矩控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- MA Hongru. Research on finite control set model predictive torque control for dual three-phase permanent magnet synchronous motor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [8] NORAMBUENA Margarita, RODRIGUEZ Jose, ZHANG Zhenbin, et al. A very simple strategy for high-quality performance of AC machines using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 794-800.
- [9] 顾明, 邢劭, 葛贤军. 感应电机无权重分配有限集模型预测控制设计[J]. 电气传动, 2022, 52(7): 3-8.
- GU Ming, XING Meng, GE Xianjun. Design of the finite set model predictive control without weight distribution for induction motor[J]. Electric Drive, 2022, 52(7): 3-8.
- [10] CUI Zhufeng, ZHANG Zhenbin, DRAGICEVIC Tomislav, et al. Dynamic sequential model predictive control of three-level NPC back-to-back power converter PMSG wind turbine systems[C]//IECON 2020 the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore: IEEE, 2020: 3206-3211.
- 收稿日期: 2022-12-11
修改稿日期: 2023-01-16
- ~~~~~
- (上接第79页)
- Power Electronics and Applications: 1-10.
- [4] 谢仕宏, 孟彦京, 高钰淇, 等. 小电容变频器及感应电机回馈能量分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 734-744.
- XIE Shihong, MENG Yanjing, GAO Yuqi, et al. Analysis about small capacitor frequency converter and feedback energy of induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 734-744.
- [5] VON Jouanne A, ENJETI P, GRAY W. Application issues for PWM adjustable speed AC motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 2(5): 10-18.
- [6] 陈涛, 刘海涛, 武彬, 等. 变频器输出电压 du/dt 对电机的影响及其滤波器的设计[J]. 大功率变流技术, 2012(1): 34-38.
- CHEN Tao, LIU Haitao, WU Bin, et al. The influence of inverter's output voltage du/dt on the motor and its filter design[J]. High Power Converter Technology, 2012(1): 34-38.
- [7] 冯志华, 杨永强, 陈慧, 等. 浅谈变频器与长电缆相连时电动机的失效现象[J]. 电工技术杂志, 2002(11): 33-35.
- FENG Zhihua, YANG Yongqiang, CHEN Hui, et al. Eliminating motor failures due to drives when connected with long leads[J]. Electric Engineering, 2002(11): 33-35.
- [8] 史晗, 蒋德智, 荣相, 等. 矿用变频器LRC滤波器寄生参数影响研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 44-50.
- SHI Han, JIANG Dezhi, RONG Xiang, et al. Research on influence of parasitic parameters of LRC filter for mine-used inverter[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 44-50.
- [9] 张凯歌, 迟颂, 李尔平. 基于遗传算法的LCL输出滤波器设计与优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(1): 211-216.
- ZHANG Kaige, CHI Song, LI Erping. Design and optimization of LCL output filter based on genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2020, 37(1): 211-216.
- [10] 钟彦禄. 变频器输出滤波器的影响与使用[J]. 清洗世界, 2020, 36(9): 88-89.
- ZHONG Yanlu. The influence of variable frequency with output reactor[J]. Cleaning World, 2020, 36(9): 88-89.
- [11] 赵春丽, 王英华, 梁安江, 等. 驱动棒电源整流器同步采样回路有源带通滤波器设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 60-66.
- ZHAO Chunli, WANG Yinghua, LIANG Anjiang, et al. Design of active band pass filter for synchronous sampling loop of drive rod power rectifier[J]. Electric Machines and Control Application, 2022, 49(2): 60-66.
- [12] 贺文军, 何山, 陈小丹, 等. 基于Rd阻尼型LCLLC滤波器的永磁同步发电机绕组谐波抑制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 84-109.
- HE Wenjun, HE Shan, CHEN Xiaodan, et al. Harmonic suppression of permanent magnet generator winding based on Rd damped LCLLC filter[J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(1): 84-109.
- 收稿日期: 2022-10-28
修改稿日期: 2023-05-17