

基于共模耦合效应的电机绕组过电压研究

幸善成, 吴正国

(海军工程大学电气工程系, 湖北省 武汉市 430033)

Analyzing Over-voltage of Induction Motor Windings Based on Common Mode Coupling Effects

XING Shan-cheng, WU Zheng-guo

(Department of Electrical Engineering Navy University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Due to its fine velocity modulation function, the inverter-motor drive systems have been applied extensively. At the same time, backside effects are accompanying. For example, electromagnetic interference, bearing currents and over-voltage caused by the long cable linked between the inverter and motor. In addition, the pulse-width modulation voltage, which is high dv/dt , can arise common mode coupling effects in the motor, and arise common mode coupling currents on the common mode coupling circuits in the motor. The winding voltage should be aberrated while the common mode coupling currents pass through the motor windings. Voltage overshoot arises accordingly. The voltage overshoot, just as the over-voltage caused by the long cable linked between the inverter and motor, impacts the insulation of windings and can result in insulation failed. This paper analyzes and calculates the windings over-voltage from the point of common mode coupling effects in the motor. An equivalent lumped parameter circuit model of common mode coupling circuit in the motor is set up. The calculation method of the common mode coupling currents and the windings over-voltage based on the model is given. The influence of common mode coupling currents on winding over-voltage is discussed. The validity and effectiveness of the models are confirmed by simulation and experiment.

KEY WORDS: induction motor; inverter; common mode coupling effect; common mode current

摘要: 高 du/dt 的 PWM 电压将会在电机内部产生共模耦合效应, 并在电机内部的共模耦合回路形成共模耦合电流, 共模耦合电流流过电机绕组时, 将引起电机绕组电压的畸变, 并产生电压过冲。与电机端子的过电压一样, 影响电机绕组的绝缘。该文从电机内部共模耦合效应的角度分析和计算了电机绕组的过电压, 建立高频情况下电机内部的共模等效电路集总参数模型, 给出共模耦合电流和电机绕组电压的计算

方法, 分析了共模耦合电流对电机绕组电压的影响, 并通过仿真和实验进行了验证。

关键词: 感应电机; 逆变器; 共模耦合效应; 共模电流

0 引言

电力电子技术的飞速发展使逆变器驱动电机的调速系统得到广泛应用, 电机的驱动电压也由原来的工频正弦波电压变为高频脉宽调制波电压, 而高频和高 du/dt 的脉宽调制波电压将会在系统中产生诸多负面效应, 如电磁干扰问题、电机的轴承电流问题、电机端子的过电压问题等, 流过电机轴承的电流会对电机的轴承造成损坏, 而电机端子的过电压则会破坏电机绕组绝缘, 这些都影响电机的使用寿命^[1-5]。

高频、高 du/dt 的脉宽调制电压还将在电机内部产生共模耦合效应, 并在电机内部的寄生耦合回路中产生共模耦合电流。共模耦合电流流过电机绕组时将引起电机绕组电压畸变, 并产生电压过冲, 影响电机绕组的绝缘, 并有可能使电机绕组的绝缘损坏。本文从电机内部共模耦合效应的角度分析和计算了电机绕组的过电压, 建立了高频情况下电机内部的共模等效电路集总参数模型, 给出了共模耦合电流和电机绕组电压的计算方法, 分析了共模耦合电流对电机绕组电压的影响。

1 电机内部共模耦合电路模型

电机内部存在两种途径的共模耦合, 即绕组到定子的共模耦合和绕组到转子的共模耦合。相比较而言, 由于电机绕组到定子的距离要大大小于绕组到转子的距离, 因此, 电机绕组到定子的耦合比到

转子的耦合要大得多^[6-10]，电机绕组到定子的共模耦合电流对电机绕组电压的影响起着决定性作用。因此在分析共模耦合电流对电机绕组电压的影响时，不考虑电机绕组到转子的耦合，单从电机绕组到定子的共模耦合角度来分析。

图 1 为包含从电机绕组到定子铁心寄生耦合电容的电机定子绕组的分布参数电路模型，电机三相绕组采用星型连接，N 为中性点，连接到地， Z_G 为地阻抗， Z 为每相绕组单位长度的阻抗， Z_W 为单位长度电机绕组到定子的耦合阻抗，主要是寄生耦合电容。 U_a 为从输入端 a 到地的共模电压，内部共模阻抗为 Z_{in} 。当用逆变器驱动电机时，共模电压为高频 PWM 脉冲，在高频范围，趋肤效应、线圈之间寄生电容的耦合、铁心损耗和渗透性的降低都会对阻抗产生影响，因此，阻抗 Z 、 Z_W 不同于正弦波驱动电机时的阻抗^[11-15]。

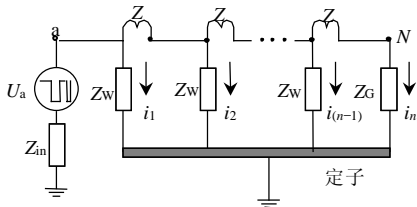


图 1 单相定子绕组寄生耦合的分布参数电路

Fig. 1 Single phase distributed circuit of motor stator windings with parasitic capacitive coupling

从图 1 可以看到，电流在流经电机绕组时，会遇到许多共模耦合回路，形成多路共模耦合电流(i_1, i_2, \dots, i_n)，为简化起见，将这些耦合电流划分为 2 种类型，即流过部分电机绕组的电流和几乎流过整个电机绕组的电流，并分别集总表示为 I_1 和 I_N ，这样就可以用一个等效的 π 型网络近似描述其输入输出关系。于是对一相来说，可得等效的集总参数电路模型如图 2 所示。

模型中， U_N 为电机绕组中点电压， L_0 、 C_0 和 R_0 为单相电机绕组的阻抗， I_1 、 L_1 、 C_1 、 R_1 为流过部分电机绕组的共模耦合电流及相应的共模回路的阻抗， I_N 、 L_N 、 C_N 、 R_N 为流过几乎整个电机绕组的共模耦合电流及相应的共模回路的阻抗， I_W 为从电机绕组到定子的总的耦合电流，包括 I_1 和 I_N 。

对于三相系统，如果仅考虑共模响应，得到共模电路的简化模型如图 3 所示。从图 3 可以看到， I_1 的谐振频率为

$$\omega_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

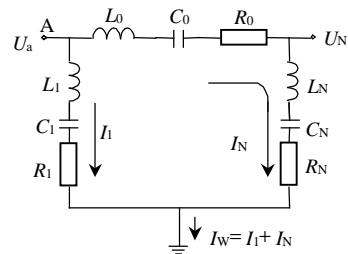


图 2 单相定子绕组寄生耦合的集总参数电路

Fig. 2 Equivalent lumped parameter circuit of motor stator windings with parasitic capacitive coupling

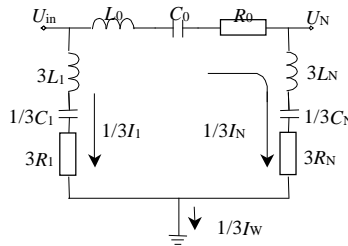


图 3 定子绕组到机壳的共模耦合电路

Fig. 3 Model of common mode coupling from windings to stator

I_N 的谐振频率为

$$\omega_2 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\sqrt{(L_0 + 3L_N)C_N}} \quad (2)$$

式中： L_0 为电机绕组的电感。与其它几个寄生参数比较，其值比较大，因此， $\omega_1 \gg \omega_2$ ，通常情况下， I_1 振荡在 MHz，而 I_N 振荡在几百 kHz，当高频、高 du/dt 的电压作用在该电路中时，大部分的耦合电流将进入 I_1 ，因此电流的畸变主要是由 I_1 产生。对于 I_N ，因为它流过几乎整个绕组，主要引起电压的畸变。另外，所有线圈中的耦合电流并不均匀，接近电机输入端的首匝线圈总是具有最小的共模阻抗，因而具有最大的耦合电流幅值，当电流从电机的首匝逐匝流过电机绕组时，阻抗越来越大，电流越来越小，电压的振荡逐步衰减，因此，耦合电流与线圈阻抗的作用结果将在首匝产生最大的电压过冲。

2 电机绕组过电压的分析计算

要对电机绕组的电压进行观测，就要提取一个观测点。通常情况下可得的观测点只有 2 个，即电机绕组的输入端子和电机绕组的中点(星形连接的三相绕组)，为防止连接电缆引起的电机端子过电压的干扰，取电机绕组的中点作为绕组过电压的观测点，即将电机绕组的中点电压 U_N 作为衡量电机绕组过电压的参考。为了得到 U_N 的计算表达式，需要得到 U_N 与 U_{in} 之间的传递函数。在图 3 中，可得到 U_{in} 与 U_N 的传递函数为

$$U_N/U_{in} = 3Z_N/(Z_0 + 3Z_N) \quad (3)$$

$$\text{当 } t=0 \text{ 时 } U_N(0)/U_{in}(0) = 3L_{SN}/(L_0 + 3L_{SN}) \quad (4)$$

$$\text{当 } t=\infty \text{ 时 } U_N(\infty)/U_{in}(\infty) = 3C_{SN}/(3C_0 + C_{SN}) \quad (5)$$

时间足够长时，由于寄生耦合效应而附加在电机绕组上的振荡电压衰减到零，而下一个脉冲电压还没有出现，从而可以认为 $U_N(\infty) = U_{in}(\infty)$ 。由式(5)可得， $C_0 = \infty$ ，即图3所示等效电路中的串联阻抗不包括电容 C_0 。事实上，电机绕组在通常的开关频率范围内表现为感性，可以忽略电容 C_0 ，在表1给出的测量结果中，也可以看到 $C_0 = \infty$ 。

Z_0 和 Z_N 的拉氏变换分别为

$$Z_0(s) = sL_0 + 1/sC_0 + R_0 \quad (6)$$

$$Z_N(s) = sL_N + 1/sC_N + R_N \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(3)得

$$\frac{U_N(s)}{U_{in}(s)} = \frac{3Z_{SN}(s)}{Z_0(s) + 3Z_{SN}(s)} = \frac{3(C_{SN}L_{SN}s^2 + C_{SN}R_{SN}s + 1)}{C_{SN}(L_0 + 3L_{SN})s^2 + C_{SN}(R_0 + 3R_{SN})s + 3} \quad (8)$$

以表1给出的一组数据为例，计算 U_N 的大小。

将表1的数据代入式(8)得

$$U_N(s) = \frac{15 \times 10^{-17} s^2 + 15 \times 10^{-7} s + 3}{25 \times 10^{-13} s^2 + 2 \times 10^{-6} s + 3} \cdot \frac{1}{s} \quad (9)$$

拉氏反变换得

$$\frac{U_N(t)}{U_{in}(t)} = 1 + \sqrt{\frac{27}{26}} e^{-0.4t} \sin(0.2 \times \sqrt{26}t - \arctan \sqrt{26}) \quad (10)$$

当 $t = (\arctan \sqrt{26} + \pi/2) / (0.2 \times \sqrt{26}) = 2.89 \mu s$ 时， $U_N(t)$ 取得其最大值：

$$U_N(t)|_{\max} = (1 + \sqrt{\frac{27}{26}} e^{-0.4t} \Big|_{t=2.89}) U_{in} = 1.32 U_{in} \quad (11)$$

从以上分析可以看到，高频情况下，电机内部的共模耦合效应使得电机绕组中点电压发生振荡，并产生一定幅值的过冲。电压过冲的幅度与电机的参数密切相关。在本文给定的一组参数下，电机绕组中点电压过冲的幅值大约是输入电压幅值的三分之一，与仿真结果和实验结果基本吻合。

前面提出了定子绕组耦合模型，模型中的参数可以通过实验进行测量，为此，建立了如图4所示的实验系统，三相鼠笼式异步电机的额定电压为380V，额定功率7.5kW，逆变器开关频率15kHz，用LRC阻抗测量仪对模型中需要的参数进行了测量，测量参数如表1所示。为避免共模电压内部阻抗的不确定性，将电机的机壳连接到直流侧负边，使共模电压的内部阻抗为零。在这种情况下，电机

绕组中点电压和地电流的波形如图5所示。从图中可以看到，电机的绕组中伴随耦合电流纹波，存在较大的电压过冲，在每相绕组中，电压过冲也是伴随着耦合电流尖峰出现的，电机绕组中这种瞬间的过电压和过电流会产生相当大的功率损耗和脉动转矩，并直接考验着电机绕组的绝缘承受能力，有可能造成电机绕组绝缘的损坏。

表1 定子耦合模型参数

Tab. 1 Parameter of stator coupling model

L	C	R
$L_0=500\mu\text{H}$	$C_0=\infty$	$R_0=100\Omega$
$L_N=10\text{nH}$	$C_N=5\text{nF}$	$R_N=100\Omega$
$L_1=9\mu\text{H}$	$C_1=750\text{pH}$	$R_1=15\Omega$

比较图5(a)和图5(b)的实验和仿真波形可以看到，两者波形基本一致，从而可以认为表1的一组参数是准确的，也验证了共模耦合电流对电机绕组过电压的影响。

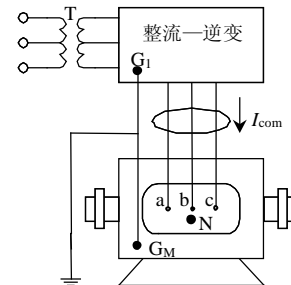


图4 测量耦合电流的实验系统

Fig. 4 Test setup for coupling current measurements

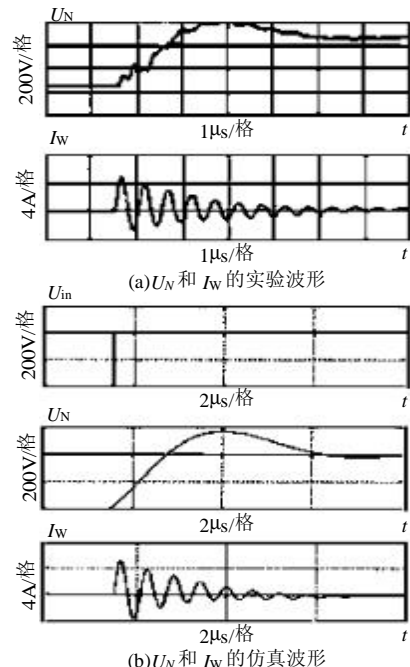


图5 U_N 和 I_w 的实验波形与仿真波形的对比

Fig. 5 Comparison of measured responses of U_N and I_w to calculated step responses of U_N and I_w based on the stator coupling model

3 结论

逆变器驱动电机系统中, 高频 PWM 脉冲型电压以及高频情况下电机内部的容性寄生耦合效应, 不仅会对系统造成电磁干扰, 同时也会影响电机使用寿命, 突出表现为电机轴承电流对电机轴承使用寿命的影响和电机过电压对绕组绝缘的影响。本文从共模耦合的角度, 讨论了电机绕组的过电压问题。建立了高频情况下电机的共模等效电路, 给出了电机过电压的计算方法, 并通过仿真和实验进行了验证。仿真和实验证明, 建立的电机内部共模耦合的集总参数电路能对电机绕组的过电压进行有效的预测, 为电机的过电压研究提供了新思路。

参考文献

- [1] Van Haute S, Malfait A, Rckmans R, et al. Losses, audible noise, and over-voltage in induction motor drives[J]. IEEE Transactions on PESC, 1995, 32(2): 585-592.
- [2] Kaufhold M. Failure mechanism of inter-turn insulation of low-voltage electric machines by pulse-controlled inverters[J]. IEEE Transaction on Electr. Insul. Mag, 1996, 12(1): 9-16.
- [3] 裴雪军, 张凯, 康勇, 等. PWM 逆变器共模干扰电流的衰减和抑制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 80-84.
Pei Xuejun, Zhang Kai, Kong Yong, et al. Damping and suppression of common mode interference currents in PWM inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 80-84(in Chinese).
- [4] Bonnet A H. Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(2): 386-392.
- [5] Kaufhold M, Auinger H, Berth M, et al. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 396-402.
- [6] 陈斌, 姜建国, 孙旭东. PWM 逆变器—感应电机驱动系统中接地电流 EMI 问题的分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 58-62.
Chen Bin, Jiang Jianguo, Sun Xudong, Analysis of EMI due to grounding current in a PWM inverter—induction motor drives system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 58-62(in Chinese).
- [7] 裴雪军, 张凯, 康勇, 等. PWM 逆变器共模干扰电流的衰减和抑制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 80-84.
Pei Xuejun, Zhang Kai, Kong Yong, et al. Damping and suppression of common mode interference currents in PWM inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 80-84(in Chinese).
- [8] Moreira A F. High frequency modeling for cable and induction motor over voltage studies in long cable drives[J]. IEEE Trans. on Ind. Application, 2002, 38(1): 1297-1306.
- [9] 咸哲龙, 钟玉林, 孙旭东, 等. 用于传导电磁干扰分析的接地回路模型与参数[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 156-161.
Xian Zhelong, Zhong Yulin, Sun Xudong, et al. Grounding circuit model and parameters for conducted EMI analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 156-161(in Chinese).
- [10] Grandi G, Casadei D, Massarini A. High frequency lumped parameter model for AC motor windings[C]. The 7th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'97), Trondheim, Norway, 1997.
- [11] 姜艳姝, 徐殿国, 陈希有, 等. 一种新颖的用于消除 PWM 逆变器输出共模电压的有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 125-129.
Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Chen Xiyu, et al. A novel PWM inverter output active filter for common mode voltage cancellation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 125-129(in Chinese).
- [12] Skibinski G, Kerkman R, Leggate D, et al. Reflected wave modeling techniques for PWM AC motor drives[C]. The 13th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'98), Kuala Lumpur, Malaysia, 1998.
- [13] Kerkman R, Leggate D, Skibinski G. Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients[C]. The 31th IEEE Industry Applications Society Conference (IAS'96), San Diego, CA, USA, 1996.
- [14] Mukundan T R. Calculation of voltage surges on motors fed from PWM drives—a simplified approach[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2004, 19(1): 223-225.
- [15] Gubbala L, Von Jouanne A, Eajeti P, et al. Voltage distribution in the windings of an AC motor subjected to high dv/dt PWM voltage [J]. IEEE PESC Conference Proceedings, 1995, 2(1): 579-585.

收稿日期: 2006-03-15。

作者简介:

幸善成(1971—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统电磁兼容, xingshancheng@163.com;

吴正国(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统电能质量管理, 数字信号处理技术等。

(编辑 王剑乔)