

文章编号:1671-251X(2014)09-0090-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.09.021

王克智,赵文瀚,王韬,等.一种中点电位平衡控制和共模电压抑制策略[J].工矿自动化,2014,40(9):90-93.

一种中点电位平衡控制和共模电压抑制策略

王克智¹, 赵文瀚², 王韬¹, 杨刚¹, 程国栋³, 耿乙文²

(1.山西潞安环保能源开发股份有限公司,山西 长治 046204; 2.中国矿业大学
信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008; 3.中国矿业大学 徐海学院,江苏 徐州 221008)

摘要:针对变频器通过长电缆对电动机供电过程中同时存在共模电压、过电压和中点电位不平衡的问题,分析了共模电压与过电压的产生机理,以及中点电位不平衡对共模电压的影响;提出了一种中点电位平衡控制和共模电压抑制策略,即在传统三电平逆变器基础上增加第四桥臂,通过控制第四桥臂的电流来控制中点电位平衡,通过优化主电路的 SVPWM 调制策略抑制共模电压。Matlab 仿真实验验证了该策略的有效性。

关键词:变频器;长电缆输电;共模电压;过电压;中点电位平衡

中图分类号:TD60 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

A strategy of neutral-point potential balance control and common-mode voltage suppression

WANG Kezhi¹, ZHAO Wenhan², WANG Tao¹, YANG Gang¹,
CHENG Guodong³, GENG Yiwen²

(1. Shanxi Lu'an Environmental Energy Development Co., Ltd., Changzhi 046204, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. Xuhai College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: For problems that there are common-mode voltage, over voltage and neutral-point potential imbalance simultaneously in power supply of inverter to motor through long cable, generation mechanisms of common-mode voltage and over voltage were analyzed as well as effect of neutral-point potential imbalance on common-mode voltage. A strategy of neutral-point potential balance control and common-mode voltage suppression was proposed, namely adding the fourth leg to traditional three-level inverter, controlling current of the fourth leg to realize neutral point potential balance and optimizing SVPWM modulation strategy of main circuit to restrain common-mode voltage. Effectiveness of the strategy is verified by Matlab simulation.

Key words: inverter; power transmission through long cable; common-mode voltage; over voltage; neutral-point potential balance

0 引言

目前,井下带式输送机电控系统广泛采用隔爆型变频器。针对矿用隔爆型变频器设计、开发、选型和维护困难等问题,笔者提出一种井下带式输送机地面集中变频长距离驱动控制系统。该系统将用于

驱动井下隔爆型异步电动机的变频器集中安装在地面,采用长电缆对井下各电动机供电,通过集中控制地面变频器实现对井下带式输送机的有效控制。

利用电缆进行长距离输电时主要存在共模电压和过电压 2 个问题。电压源型 PWM 变频器通常会

产生高频共模电压,高频共模电压在电动机绕组中

收稿日期:2013-12-20;修回日期:2014-07-19;责任编辑:李明。

基金项目:潞安集团科技计划资助项目(2012-环-Y-O3)。

作者简介:王克智(1964—),男,山西运城人,高级工程师,主要从事煤矿机电管理工作,E-mail:wkz63@sina.com。

经电容产生共模电流,流经电动机轴承形成轴电流,使电动机在短期内因电气原因而损坏,缩短其使用寿命。此外,变频器驱动交流电动机时,驱动电压、电流中含有大量的高频成分,增加了电动机损耗。加上长电缆的存在,电动机等效阻抗与电缆阻抗很难达到匹配,变频器输出的电压脉冲信号经长电缆传输后在电动机端和逆变器端发生反射叠加,使得电动机端电压加倍,对电动机绝缘造成很大威胁,甚至造成电动机或电缆的绝缘击穿,严重时会导致电动机烧毁、电缆爆裂等^[1-3]。

本文基于三电平 PWM 变频器,分析了长电缆输电过程中过电压及共模电压产生的原因,以及中点电位不平衡对共模电压的影响。为解决三电平 PWM 变频器系统同时存在中点电位不平衡和共模电压的问题,提出了一种中点电位平衡控制和共模电压抑制方法,并通过仿真验证了该方法的有效性。

1 长电缆输电过程负面影响

1.1 共模电压产生机理

共模电压也称零序电压,是指电动机绕组中性点与逆变器中性点之间的电压。以三电平 NPC (Neutral Point Clamped, 中性点箝位) 逆变器为例进行说明,图 1 为 PWM 变频器无长线驱动电动机结构。

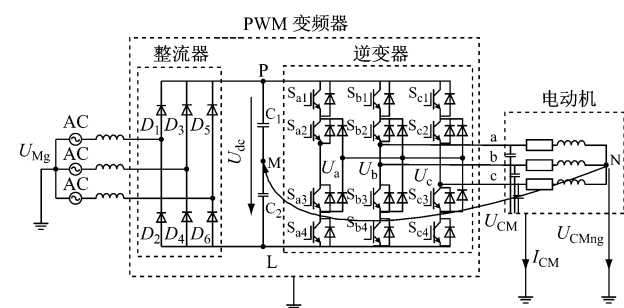


图 1 PWM 变频器无长线驱动电动机结构

图 1 中, U_{dc} 为变频器直流侧电压, U_a, U_b, U_c 为变频器输出端相电压, U_{CM} 为共模电压, I_{CM} 为共模电流, U_{CMNg} 为电动机绕组中点 N 对系统地电压, U_{Mg} 为逆变器中点 M 对系统地电压。则有

$$U_{CM} = U_{NM} = U_{CMNg} + U_{Mg} \quad (1)$$

U_{Mg} 相当于整流器产生的共模电压。由于整流脉动比较小,一般考虑中点电位平衡,即 $U_{Mg} \approx 0$ 。此时共模电压为

$$U_{CM} = U_{CMNg} \quad (2)$$

此时电动机端对参考点 N 电压为

$$\begin{cases} U_a = R_i i_{am} + L_i \frac{di_{am}}{dt} + U_{CMNg} \\ U_b = R_i i_{bm} + L_i \frac{di_{bm}}{dt} + U_{CMNg} \\ U_c = R_i i_{cm} + L_i \frac{di_{cm}}{dt} + U_{CMNg} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_i 为电动机每相等效电阻; L_i 为电动机每相等效电感; i_{am}, i_{bm}, i_{cm} 为电动机端三相电流。

将式(3)中 3 个微分方程相加,得

$$U_a + U_b + U_c = (R_i + L_i \frac{d}{dt})(i_{am} + i_{bm} + i_{cm}) + 3U_{CMNg} \quad (4)$$

考虑到电动机绕组三相对称,因此 $i_{am} + i_{bm} + i_{cm} \approx 0$, 则共模电压为

$$U_{CM} = U_{CMNg} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (5)$$

在 PWM 调制中,开关器件在每个时刻的导通、关断组合决定了逆变器的输出电压,从而决定了共模电压的变化。可见,共模电压由 PWM 调制方式决定,当电动机三相绕组对称时共模电压为 0。

三电平 PWM 变频器一共有 27 种开关状态,每相输出 3 个电平: $U_{dc}, -U_{dc}/2, 0$ 。根据共模电压定义,共模电压分别为 $\pm U_{dc}/2, \pm U_{dc}/3, \pm U_{dc}/6, 0$ 。

1.2 过电压产生机理

电压源型 PWM 变频器因调制策略的固有特性会产生共模电压。当采用长电缆输电时,电缆分布参数会对共模电压产生放大作用,此时电缆和电动机都具有高频特性。根据传输线理论^[4],当电缆和电动机阻抗不匹配时,脉冲波会发生反射,多次反射后的脉冲波和之前的脉冲波叠加,会在电动机端产生过电压,过电压会在电动机端产生漏电流和轴电压,严重影响电动机的绝缘特性,缩短电动机的使用寿命。共模电压也是产生过电压的一个重要因素。抑制共模电压可以从根本上减小过电压。

1.3 中点电位不平衡对共模电压的影响

中点电位平衡是三电平 PWM 变频器的一个重要研究问题。开关器件特性不一致、控制算法及负载等因素都会引起中点电位不平衡,导致逆变器输出电压波形畸变、开关器件承受电压不均衡,还可能导致三电平退化为两电平等问题。而共模电压为负载中性点对直流母线的中点电压,因此中点电位不平衡会对共模电压产生影响,加剧共模电压的危害。

如图 1 所示,假设中点 M 电位发生偏移 ΔU ,直流侧电容 C_1 的电压为 $U_{dc}/2 + \Delta U$,直流侧电容 C_2 的电压为 $U_{dc}/2$ 。逆变器输出每一相在任一时刻对中点

O 的电压变为 $U_{dc}/2+\Delta U, 0$ 或 $-U_{dc}/2$ 。中点电位偏移后三电平 PWM 变频器产生的共模电压见表 1。

表 1 中点电位偏移后三电平 PWM 变频器产生的共模电压

开关状态	共模电压
111	$U_{dc}/2+\Delta U$
-1-1-1	$U_{dc}/2$
000	0
0-1-1,-1-10,-10-1	$U_{dc}/3$
110,101,011	$ 2\Delta U/3+U_{dc}/3 $
-100,0-10,00-1	$U_{dc}/6$
100,010,001	$ \Delta U/3+U_{dc}/3 $
10-1,01-1,-110,-101,0-11,1-10	$ \Delta U/3 $
1-1-1,11-1,-11-1,-111,-1-11,1-11	$ \Delta U/3-U_{dc}/6 $

2 中点电位平衡控制和共模电压抑制策略

中点电位平衡控制方法都是基于优化逆变器调制策略的思想^[4],从不同的角度改变正负小矢量的作用时间来控制中点电位平衡。由参考文献[5-7]可知,共模电压抑制方法都是尽量减少 111,110,101,011,0-1-1,-10-1,-1-10,-1-1-1 这 8 个开关状态的使用,而这 8 个开关状态中有 6 个是正小矢量。在中点电位平衡控制中都是采用成对的正负小矢量控制中点电位平衡的,正负小矢量不能随意舍弃。目前很难找到一种能够兼顾中点电位平衡控制和共模电压抑制的调制方法。

本文根据参考文献[8-9],提出基于 SVPWM 优化的三相四桥臂逆变器。该逆变器能达到同时控制三电平逆变器中点电位平衡和抑制共模电压的目的。三相四桥臂逆变器拓扑结构如图 2 所示。

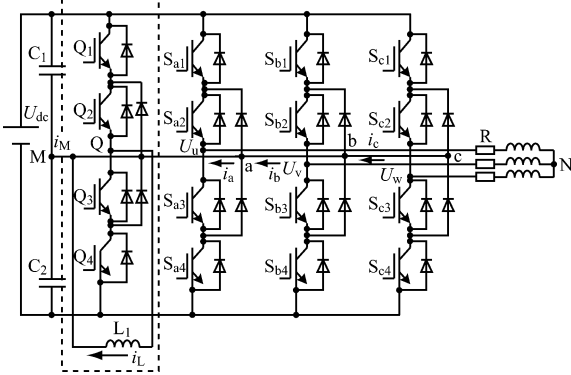


图 2 三相四桥臂逆变器拓扑结构

图 2 中虚线框部分为新增的第四桥臂,其由开关管 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 组成,桥臂的输出 Q 通过电感

L_1 与直流母线中点 M 相连。中点电流为

$$i_M = i_a + i_b + i_c + i_L \tag{6}$$

式中: i_a, i_b, i_c 分别为逆变器三相桥臂二极管中点 a, b, c 流向中点 M 的电流; i_L 为第四桥臂中点 Q 经电感 L_1 流向 M 点的补偿电流。

由式(6)可知,第四桥臂的电流 i_L 可对直流母线电容进行充放电。因此,可通过控制第四桥臂的电流来控制中点电位平衡。

第四桥臂的 4 个开关状态见表 2。开关状态为 1 时, i_L 对 C_1 放电,对 C_2 充电,使中点电位波动趋于 0;开关状态为 4 时, i_L 对 C_2 放电,对 C_1 充电,使中点电位波动趋于 0,从而控制中点电位平衡;开关状态为 2 和 3 时, $i_L=0$,对 C_1, C_2 不作用。

表 2 第四桥臂的 4 个开关状态

开关状态	开关管状态			
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
1	开通	开通	关断	关断
2	开通	关断	开通	关断
3	关断	开通	关断	开通
4	关断	关断	开通	开通

为了控制中点电位平衡,可根据 C_1, C_2 的电压偏差 Δu_{pn} 来决定第四桥臂的开关状态,见表 3。

表 3 中点电位平衡控制策略

$\Delta u_{pn} > 0$	开关状态 1
$\Delta u_{pn} < 0$	开关状态 4
$\Delta u_{pn} = 0$	开关状态 2, 3

由于第四桥臂采用独立的控制策略,在制定三相主桥臂的调制算法时不需要考虑中点电位平衡问题。可在通过第四桥臂控制中点电位平衡的基础上,对主电路的 SVPWM 调制策略进行优化,抑制共模电压,从而实现三电平逆变器共模电压抑制和中点电位平衡控制。

3 仿真实验

为了研究中点电位不平衡对共模电压产生的影响,验证中点电位平衡控制和共模电压抑制策略的正确性和有效性,在 Matlab 仿真软件中搭建三电平 NPC 逆变器仿真模型。仿真参数:直流给定电压 $U_{dc}=1\ 612\text{ V}$,负载为 RL 负载,负载电阻 $R=2.34\ \Omega$,负载电感 $L=0.04\text{ H}$,直流侧上、下桥臂电容 $C_1=C_2=2.2\text{ mF}$ 。

中点电位不平衡时,中点电位和共模电压波形如图 3 所示。

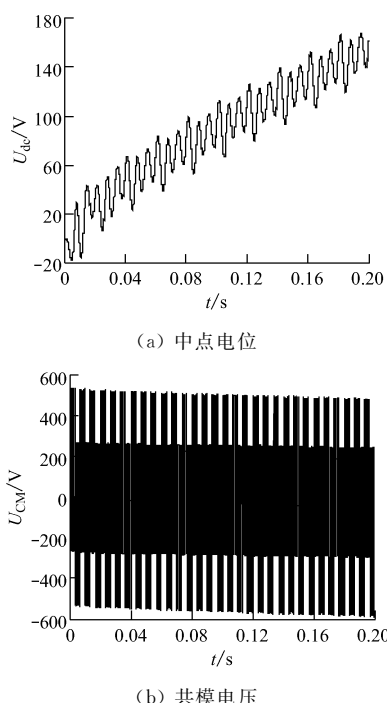


图3 中点电位不平衡时中点电位和共模电压波形

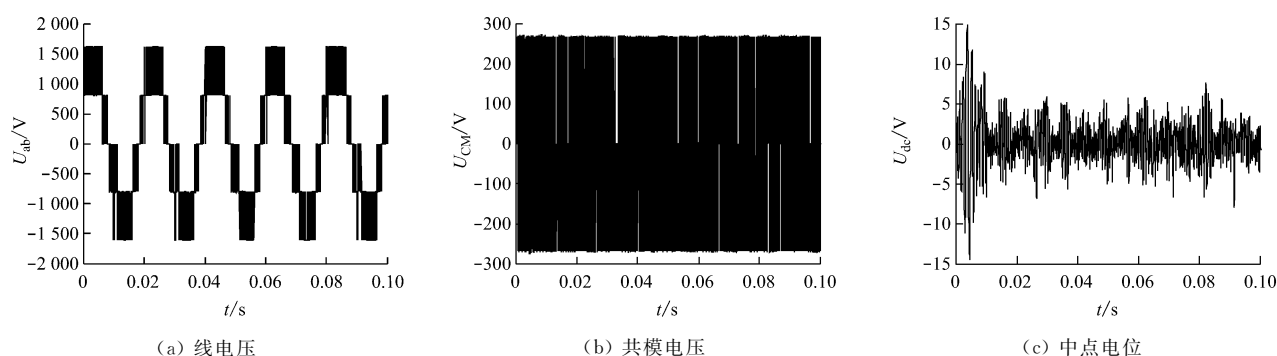


图4 基于SVPWM优化的三相四桥臂逆变器电压波形

控制和共模电压抑制策略兼顾了中点电位平衡控制和共模电压抑制,其有效性在 Matlab 仿真实验中得到验证。

参考文献:

[1] 马洪飞,徐殿国,陈希有,等. PWM 逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(11):109-113.

[2] 万健如,刘英培,周海亮. 基于传输线理论电力高频脉冲在电缆上的传输与反射研究[J]. 物理学报,2010,59(5):2948-2951.

[3] PERSSON E. Transient effects in application of PWM inverters to induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992,28(5):1095-1101.

[4] 唐丽娜,倪帅,戴鹏,等. NPC 三电平整流器中点电位控制方法的研究[J]. 电气传动,2012,42(7):41-45.

[5] 党存禄,赵鹏林,董瑞洪. 双级矩阵变换器空间矢量调

从图3可看出,三电平 NPC 逆变器中点电位不平衡时,共模电压在纵轴上有一直向下的趋势,共模电压的幅值持续增加,对变频器系统带来的危害将加剧。因此若要抑制三电平 NPC 逆变器的共模电压,首先要保证直流侧的中点电位平衡。

基于 SVPWM 优化的三相四桥臂逆变器电压波形如图4所示。

从图4可看出,采用基于 SVPWM 优化的三相四桥臂逆变器后,中点电位可控制在 $\pm 5\text{ V}$ 之内,三电平 NPC 逆变器输出的共模电压被抑制在 $\pm U_{dc}/6$ 之内,且逆变器输出线电压的正弦度得到保证。可见基于 SVPWM 优化的三相四桥臂逆变器可很好地抑制共模电压和控制中点电位平衡。

4 结语

PWM 变频器通过长电缆向电动机供电过程中,共模电压、过电压、中点电位不平衡问题同时存在,对电动机产生不良影响。提出的中点电位平衡

制策略改进[J]. 工矿自动化,2013,39(6):56-61.

[6] 成建鹏. 高压变频器和电子电力变压器共模电压研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

[7] TALLAM R M, KERKMAN R J, LEGGATE D, *et al.* Common-mode voltage reduction PWM algorithm for AC drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications,2010,46(5):1959-1969.

[8] CUZNER R M, BENDRE A R, Faill P J, *et al.* Implementation of a four-pole dead-time-compensated neutral-point-clamped three-phase inverter with low common-mode voltage output[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications,2009,45(2):816-826.

[9] RENDUSARA D A, ENJETI P N. An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1998,13(6):1135-1143.