

注入 3 次谐波控制的共模电压分析

黄守道, 葛照强, 肖慧慧, 叶光辉

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 由于功率器件仅有 2 个开关状态, 输出电压只能离散变化, 造成中性点存在共模电压, 对电机的运行产生负面效应。以传统两电平变频器 and 级联型高压变频器为例, 分析了共模电压产生机理和 3 次谐波注入理论, 在此基础上, 分析注入 3 次谐波在提高直流电压利用率的同时, 对输出共模电压造成的影响。经对比发现, 共模电压新增加了 3 次谐波电压成分, 当调制比取最大值时, 共模电压中 3 次谐波电压幅值达到最大, 加剧了共模电压对电机可靠运行的影响。通过 Matlab 仿真, 验证了理论分析的正确性, 并进一步说明了, 对采用同相调制算法的变频器, 注入 3 次谐波将导致共模电压增加。

关键词: 共模电压; 3 次谐波; 高压变频器; 级联

中图分类号: TM 714.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0008-04

同传统的两电平变频器相比, 高压变频器存在功率器件电压等级要求较高, 电压、电流变化率大, 拓扑结构无统一形式等特点。通过直接串联功率器件实现高压输出的变频器结构, 存在功率器件稳态和动态均压问题, 对高压变频器可靠运行影响较大。由三电平变频器发展而来的二极管箝位式和飞跨电容式多电平变频器输出谐波成分较少, 但随着输出电压等级的升高, 主电路结构将过于复杂, 不易扩展。级联型高压变频通过模块化功率单元的积木式结构, 主电路结构简单, 输出电压、电流失真小, 易于维修和故障排除; 并且可以直接使用目前比较成熟的 SPWM 控制技术, 应用广泛^[1-5]。基于载波移相控制的级联型高压变频器同传统的两电平变频器一样存在共模电压问题, 并且由于电压等级较高对电压的负面影响更大^[6-7]。本文将在分析共模电压产生机理和 3 次谐波注入控制策略的基础上, 分析在采用同相多载波控制时 3 次谐波注入对输出共模电压造成的影响。

1 共模电压产生机理

传统的两电平变频器的拓扑结构如图 1 所示。

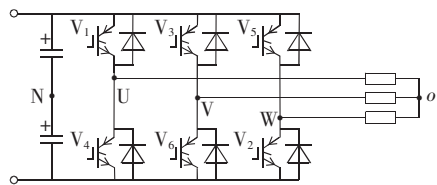


图 1 两电平变频器拓扑图

Fig.1 Topology of two-level inverter

输出桥臂仅有 8 个开关状态, 当 V_1 导通时电压 $u_U = U_d/2$, 当 V_4 导通时电压 $u_U = -U_d/2$ 。负载中心点

o 与直流电源假想中点之间的电压为 u_{oN} (实际即为共模电压), 各相负载的相电压可以表示为

$$u_{Uo} = u_{UN} - u_{oN}, \quad u_{Vo} = u_{VN} - u_{oN}, \quad u_{Wo} = u_{WN} - u_{oN} \quad (1)$$

即有

$$u_{oN} = \frac{1}{3} (u_{UN} + u_{VN} + u_{WN}) - \frac{1}{3} (u_{Uo} + u_{Vo} + u_{Wo}) \quad (2)$$

当负载为三相对称负载时, 式(2)右侧第 2 项为零, 可得到输出共模电压的表达式为

$$u_{com} = u_{oN} = \frac{1}{3} (u_{UN} + u_{VN} + u_{WN}) \quad (3)$$

由于三相电压取值只能为 $U_d/2$ 或 $-U_d/2$, 三相电压瞬时值之和就不为零, 从式(3)中可以得到共模电压的大小为 $\pm U_d/6$ ^[8]。高频的共模电压容易通过定、转子及电机机座的静电耦合造成电机轴向电流而致使电机的转轴过早失效。同时, 轴向电流通过寄生电容和接地导体回流到主电路, 可能造成零序短路保护动作和电磁干扰(EMI)等问题^[9-11]。级联型高压变频器与传统两电平变频有着相类似的性质, 同样存在共模电压的问题。对于级联型高压变频器, 其拓扑结构如图 2 所示, 共模电压定义形式与两电平相似, 即

$$u_{com} = \frac{1}{3} (u_{AN} + u_{BN} + u_{CN}) \quad (4)$$

对于单个功率单元输出电压有 3 个等级: $+E$ 、0 和 $-E$ 。5 级串联输出时每相输出最多有 11 个电压等级, 这样从式(4)可以看出共模电压的最大取值为 $\pm 5E$ 。采用多载波的同相调制控制时, 由于载波的空间移相使得输出共模电压实际上是在 $\{E/3, 0, -E/3\}$ 间变化, 其中 E 为功率单元整流桥输出直流母线电压。

5 级功率单元串联输出时, 输出电压最多有 11 个电压等级 (E 的整数倍), 也就意味着输出电压只

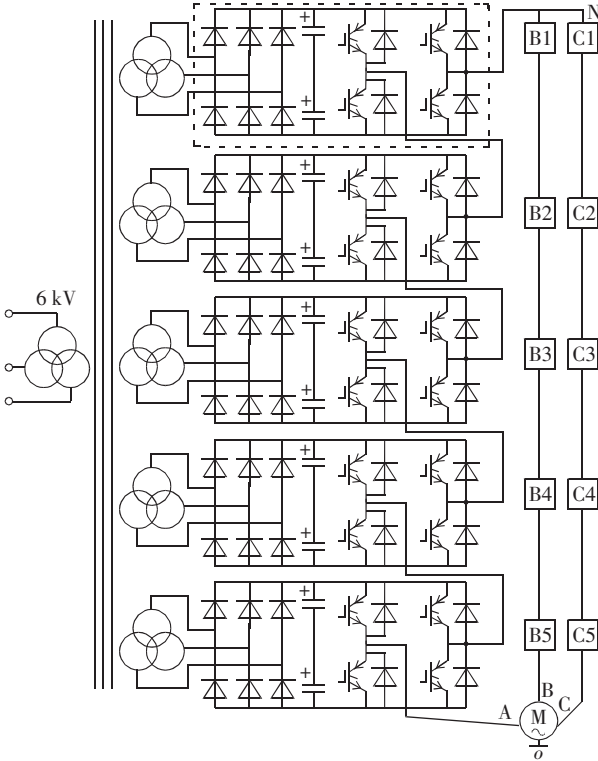


图 2 级联型变频器拓扑结构
Fig.2 Topology of cascade inverter

能在这 11 个离散的电压等级上跳变来等效一个连续的、标准的正弦交流电压。在某一时刻原本对称的三相交流电压被离散成 3 个一定幅值的输出电压,就不能确保这 3 个离散的电压满足三相之和为零,这就意味着输出存在共模电压。采用 PWM 控制技术实现正弦交流电压输出时,输出电压为脉动的矩形波 (SPWM),其基波成分即为所需的标准正弦波,且三相严格对称,叠加后不产生共模电压。但输出 SPWM 波中的谐波成分不一定满足三相严格对称,三相叠加会产生共模电压,所以共模电压也可以看作是三相输出不平衡的谐波成分叠加的结果。这从下文要分析的 3 次谐波注入时共模电压增加的情况可以看出。

2 3 次谐波注入理论

在多载波移相控制中,同相调制算法的直流电压利用率最高,实际中应用最为广泛。使用同相调制算法时,每个功率单元左右桥臂的调制波 (以 A 相为例) 分别为

$$f_1(t) = +M \sin \omega t, \quad f_2(t) = -M \sin \omega t \quad (5)$$

每个功率单元输出的电压满足:

$$u_{An} = ME \sin \omega t + u_{Ah} \quad n = 1, 2, \dots, N' \quad (6)$$

式中 M 为调制比; E 为直流电压; u_{Ah} 为谐波成分。

N' 级功率单元串联时输出电压满足: $u_{AN} = \sum_{n=1}^{N'} u_{An}$ 。

调制比 M 最大值为 1。为提高直流电压的利用率,在标准正弦调制波中注入 3 次谐波,其幅值为基波的 $1/6$,则有

$$\begin{aligned} f'_1(t) &= M \sin \omega t + \frac{1}{6} M \sin 3\omega t \\ f'_2(t) &= -M \sin \omega t - \frac{1}{6} M \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (7)$$

这样, M 最大可达到 $2/\sqrt{3}$, 相当于输出电压提高到原来的 $2/\sqrt{3}$ 倍。 N' 级功率单元串联输出电压满足:

$$\begin{aligned} u'_{AN} &= \sum_{n=1}^{N'} (u_{An} + u_{An3}) \approx \\ &\sum_{n=1}^{N'} u_{An} + \frac{1}{6} N' ME \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (8)$$

对于三相负载对称,线路中不会产生 3 次谐波电流,所以注入 3 次谐波对电机的运行也不会造成危害。5 个功率单元串联输出的电压、电流的频谱图如图 3 和图 4 所示 (λ 为谐波次数;后同),可以看出,虽然输出电压中含有较大 3 次谐波成分,但无 3 次电流成分存在。

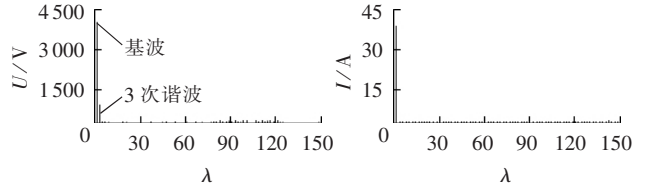


图 3 相电压频谱图

Fig.3 FFT of phase-to-phase voltage

图 4 电流频谱图

由于 3 次谐波频率为基频的 3 倍,这就造成了 B、C 两相内注入的 3 次谐波与 A 相的同相位、同幅值。B、C 两相的输出电压可表示为

$$\begin{aligned} u'_{BN} &= \sum_{n=1}^{N'} (u_{Bn} + u_{Bn3}) \approx \\ &\sum_{n=1}^{N'} u_{Bn} + \frac{1}{6} N' ME \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u'_{CN} &= \sum_{n=1}^{N'} (u_{Cn} + u_{Cn3}) \approx \\ &\sum_{n=1}^{N'} u_{Cn} + \frac{1}{6} N' ME \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (10)$$

式 (8)~(10) 代入式 (4) 即可求得注入 3 次谐波后的共模电压:

$$\begin{aligned} u'_{com} &= \frac{1}{3} (u'_{AN} + u'_{BN} + u'_{CN}) = \\ &u_{com} + \frac{N'}{6} ME \sin 3\omega t \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) 和式 (4) 对比可以看出共模电压新增加了 3 次谐波电压成分 $\frac{N'}{6} ME \sin 3\omega t$, 当调制比 M 取最大值时,共模电压中 3 次谐波电压幅值达到最大值 $\frac{N'}{3\sqrt{3}} E \sin 3\omega t$, 加剧了共模电压对电机可靠运行的影响。对于采用同相调制控制的高压变频器,在注入 3 次谐波提高直流电压利用率时,必须慎重考虑 3 次共模电压带来的影响。对于采用普通高压电机作为控制对象时,应考虑引入共模电抗器抵制共

模电压的影响。由于共模电压大部分被输入变压器分担,所以对变压器的绝缘等级也要重新考虑^[9-10]。

3 仿真分析

下面通过 Matlab 软件进行仿真分析,验证理论分析的结果。仿真参数:系统 STEP 设为 10^{-5} s;FFT 的采样时间取为 50×10^{-6} s;三角载波周期为 0.002 s;正弦调制波频率为 50 Hz;调制比 M 设为 0.9;直流电压 E 为 900 V。

采用标准正弦调制波控制策略,三相输出电压的共模电压波形和频谱如图 5 和图 6 所示,从图中可看出共模电压的变化主要集中在 ± 300 V ($\pm E/3$) 之间,除 100 次谐波附近的幅值略大外,其余的幅值一般不超过 40 V。

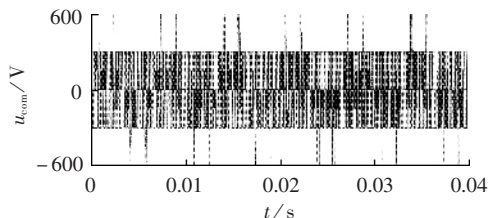


图 5 SPWM 控制共模电压
Fig.5 CMV under SPWM control

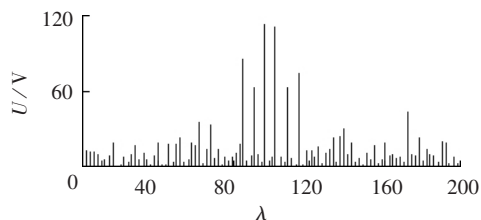


图 6 SPWM 控制共模电压频谱
Fig.6 FFT of CMV under SPWM control

注入 3 次谐波后的共模电压波形和频谱如图 7 和图 8 所示,明显可以看出输出共模电压出现较大脉动,新增加了 3 次谐波成分。

图 7 还给出了经低通滤波(截止频率为 3 kHz)后的共模电压 u_{cm3} 波形,其幅值为 674 V,同理论计算值 675 V 相近。这进一步说明,对采用同相调

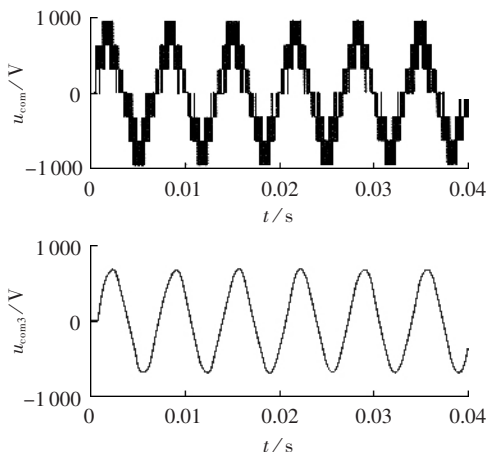


图 7 注入 3 次谐波的共模电压
Fig.7 CMV with third-order harmonic injection

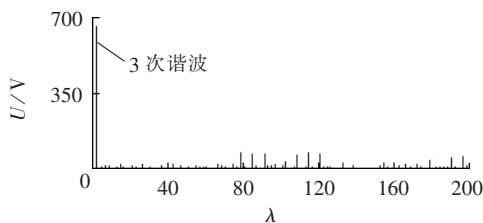


图 8 注入 3 次谐波的共模电压频谱
Fig.8 FFT of CMV with third-order harmonic injection

制算法的变频器,注入 3 次谐波将影响共模电压的输出。所以在选择同相调制算法生成 SPWM 驱动波时,若是为了进一步提高直流电压的利用率而注入了 3 次谐波成分,需注意因此而带来的共模电压增加问题。尤其是在变频器采用长线传输时,共模电压带来的问题将更加严重^[6,11]。

4 结论

随着高压电机传动控制的发展,对高压变频器的研究逐步深入,共模电压问题逐渐成为研究对象。由共模电压引起的轴电压和轴电流,进而造成绝缘提前老化和转轴过早损坏等一系列问题将是研究的主要对象。本文在分析传统低压变频器共模电压的基础上,分析了级联型多电平高压变频器共模电压产生机理。通过分析 3 次谐波注入控制算法,从理论上分析了因调制波中注入 3 次谐波而致使共模电压增加的问题。并通过 Matlab 仿真软件对同相调制算法进行仿真分析,验证了理论分析的正确性,对高压变频器控制策略的选择及实际应用有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 吴忠智,吴加林. 中(高)压大功率变频器应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 傅电波,尹项根,王志华,等. 高压变频器分段 SPWM 控制策略的实现研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(10):13-16.
FU Dian-bo, YIN Xiang-gen, WANG Zhi-hua, et al. Research and implementation of medium-voltage inverter based on time-segment SPWM control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10): 13-16.
- [3] RODRIGUEZ J, LAI J S, PENG F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 724-738.
- [4] 朱凌,刘涛,鲁志平,等. 基于 DSP 的载波移相多电平 PWM 实现方法[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 21-25.
ZHU Ling, LIU Tao, LU Zhi-ping, et al. Realization of multilevel carrier phase-shifting PWM based on DSP[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 21-25.
- [5] 王鸿雁,陈阿莲,邓焰,等. 基于控制自由度组合的多电平逆变器载波 PWM 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 131-135.
WANG Hong-yan, CHEN A-lian, DENG Yan, et al. Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 131-135.
- [6] 李维波,毛承雄,陆继明,等. 高压变频器输出电缆影响仿真研究

[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):77-81,87.

LI Wei-bo,MAO Cheng-xiong,LU Ji-ming,et al. Study of the influence of output cable terminated in a high-voltage adjustable speed drive system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(7):77-81,87.

[7] ZHANG Hao-ran,von JOUANNE A,DAI Shao-an,et al. Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltage[J]. IEEE Trans on Industry Applications,2000,36(6):1645-1653.

[8] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[9] 王志华,尹项根,程汉湘,等. 级联型高压变频器调速系统共模电压分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):58-62.

WANG Zhi-hua,YIN Xiang-gen,CHENG Han-xiang,et al. Common-mode voltage analysis of cascaded MV-VFD[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(15):58-62.

[10] 姜艳姝,徐殿国,赵洪,等. 多电平 SPWM 变频器中共模电压抑制技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):18-22.

JIANG Yan-shu,XU Dian-guo,ZHAO Hong,et al. Research on common-mode voltage reduction in multilevel inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(3):18-22.

[11] 毛承雄,李维波,陆继明,等. 高压变频器共模电压仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):57-62.

MAO Cheng-xiong,LI Wei-bo,LU Ji-ming,et al. Study of the common-mode voltage in a high-voltage ASD'system[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):57-62.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

黄守道(1962-),男,湖南资兴人,教授,主要从事稀土永磁电机的设计与控制、电机的变频调速等方面的研究;

葛照强(1981-),男,山东曹县人,硕士研究生,主要从事高性能变频调速方面的研究(E-mail:gq_300@163.com)。

Research on common-mode voltage with third-order harmonic injection

HUANG Shou-dao,GE Zhao-qiang,XIAO Hui-hui,YE Guang-hui
(Hunan University,Changsha 410082,China)

Abstract: Power devices have only two states,their output voltage is discontinuous and the common-mode voltage exists in the neutral point,which will cause negative effect on motor operation. With traditional two-level inverter and cascade high-voltage inverter as examples,the mechanism of common-mode voltage generation and the theory of third-order harmonic injection are studied. When the third-order harmonic is injected to raise the usage factor of DC voltage,its influence on common-mode voltage is analyzed. There is third-order harmonic component added in common-mode voltage. When maximal modulation ratio is selected,the amplitude of the third-order harmonic voltage in common-mode voltage also reaches the maximum,which may further affect the reliable operation of generators. Simulations with Matlab prove the correctness of theoretic analysis and illuminate that the third-order harmonic injection into inverter controlled by in-phase modulation will increase common-mode voltage.

Key words: common-mode voltage; third-order harmonic; high-voltage inverter; cascade