

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.3.163

中图分类号:TM301

文献标志码:A

改善低直流母线电容电机驱动系统 稳定性方法

陈发毅,钱振天,姚文熙,吕征宇
(浙江大学电气工程学院,杭州 310027)

摘要:使用薄膜电容代替电解电容的低直流母线电容电机驱动系统具有更长的寿命、更少的成本和体积以及更高的功率因数等优势,可消除电解电容带来的诸多弊端,但也造成了诸如系统稳定性等问题。首先对低直流母线电容电机驱动系统的稳定性进行了理论分析;在此基础上,采用重构直流母线电压参考信号的有源阻尼法解决了系统稳定性问题;最后,通过实验在无速度传感器感应电机驱动系统中验证了该方法的有效性。

关键词:低直流母线电容;稳定性;有源阻尼;电压重构

Method for Improving the Stability of Small DC-link Capacitance Drive System

CHEN Fayi, QIAN Zhentian, YAO Wenxi, LYU Zhengyu
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A small DC-link capacitance drive system equipped with film capacitor instead of electrolytic capacitor has many advantages, such as a longer life, lower cost, smaller volume, and higher power factor, which eliminates the drawbacks resulting from electrolytic capacitor. However, it also brings problems such as system instability. In this paper, the stability of a small DC-link capacitance drive system(SDCDS) is theoretically analyzed at first. On this basis, the active damping method with the DC-link voltage reference signal reconstruction is used to solve the instability problem. Finally, an experiment was conducted on a sensorless induction motor drive system, which verified the effectiveness of the proposed method.

Keywords: small DC-link capacitance; stability; active damping; voltage reconstruction

在 AC-DC-AC 电机驱动系统中,通常需要几百到几千微法的直流支撑电容用于保持直流环节电压稳定。由于电解电容单位体积的容值大,有高密度能量存储能力,因此被广泛用作直流支撑电容,然而,使用电解电容有几个固有的缺陷。首先,当前端使用不控整流时,交流电源电流 I_m 畸变严重,输入功率因数恶化;其次在接入时对电解电容充电,会出现很大的尖峰电流。为了解决这些问题,需要额外添加电路,例如功率因数校正电路、输入滤波器和预充电电路等;再者,使用电解电容在可靠性

上有致命的缺点^[1]。因此国内外许多学者开始研究使用小容量薄膜电容作为直流支撑电容^[2-8],这种系统被称作低直流母线电容电机驱动系统 SDCCDS(small DC-link capacitance drive system)。使用薄膜电容代替电解电容,可以消除电解电容带来的诸多弊端。但此时整流和逆变两个环节的电气量就被耦合到一起,从而引发一系列新的问题。其中,逆变器的直流环节电压波动会加大,可能会不稳定,尤其是在满载情况下。当逆变器为恒功率负载 CPL(constant power load)时,这个问题变得更加严重。

在前端为三相不控整流的 SDCCDS 中,解决系统的不稳定性问题最简单的办法是无源阻尼法。文献[9]

综述了在直流母线上增加无源阻尼电路的几种方法,文献[10]则对其中一种阻尼方法进行了具体分析和优化。

然而无源阻尼有如下缺点:①需要额外硬件电路,增加了系统体积和成本;②不同系统,电路选择不同。因此有源阻尼法被提出。

有源阻尼法主要分为电压模式和电流模式两种^[11]。电流模式就是控制逆变器输出电流,最常用的是根据直流母线电压扰动量向转矩电流参考信号注入阻尼电流^[12]。虽然该方法解决了稳定性问题,但需要一个更高带宽的电流控制器去跟踪直流电压动态信号,此时也需要更高的开关频率,增加了系统损耗。另外,当直流母线电压振荡频率太高(高于电流控制器带宽)时,电流控制器无法产生所需的电流信号。因此,对于抑制高频率的振荡,控制逆变器的电压信号更为有效。文献[13]提出了通过有源阻尼控制逆变器电压信号来提高系统稳定性,然而随着工作条件和系统参数的变化,系统特征方程会发生变化,此时注入的阻尼电流(电压)就要进行调整;针对此问题,文献[14]提出了一种重构直流母线电压参考信号的有源阻尼方法,将其应用到有速度传感器的同步电机控制系统中获得了理想效果。

本文针对无速度传感器感应电机的 SDCDS 系统,设计了基于母线电压参考信号反馈的有源阻尼方法,并通过实验验证了其有效性。

1 SDCDS 稳定性分析

三相不控整流逆变电路如图 1 所示,图中,每个时刻整流器的 6 个二极管只有 2 个导通,因此可以将其等效为准直流电压源和串联的阻抗。此外,PWM 逆变器和电机负载可以被看成是一个电流源(i_{inv})模型,该电流源的大小为一个 PWM 周期内由直流侧流入逆变器的平均电流。三相不控整流简化模型如图 2 所示,其中, L_g 和 R_g 分别表示等效串联电感和电阻, C_{dc} 表示直流母线电容, v_{dc} 表示直流母线电压, v_{in} 表示准直流电压源电压, i_g 表示准直流电压源的输出电流^[13]。

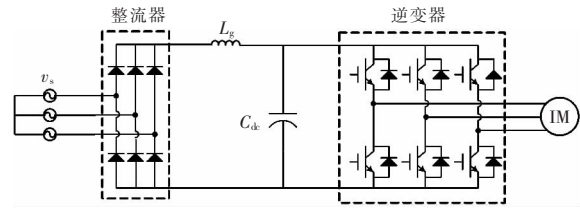


图 1 三相不控整流逆变电路拓扑

Fig.1 Topology of three-phase uncontrolled rectification converter circuit

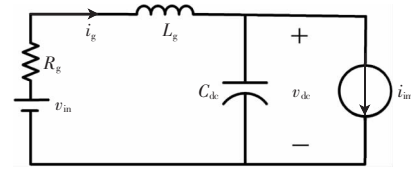


图 2 三相不控整流简化模型

Fig.2 Simplified model of three-phase uncontrolled rectifier

对简化模型列写系统状态方程,可得

$$\begin{cases} C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_g - i_{inv} \\ L_g \frac{di_g}{dt} = v_{in} - R_g i_g - v_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

采用矢量控制的三相感应电机可假设为恒功率负载,记功率为 P_L 。忽略逆变器损耗时,该功率等于逆变器输入功率,也即电流 i_{inv} 与电容电压 v_{dc} 的乘积。将 i_{inv} 和 v_{dc} 均采用稳态值加小信号的方式表示,则逆变器输入电流 i_{inv} 可表示为

$$i_{inv} = i_{inv0} + \tilde{i}_{inv} = \frac{P_L}{v_{dc}} = \frac{P_L}{v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}} \cong \frac{P_L}{v_{dc0}} - \frac{P_L}{v_{dc0}^2} \tilde{v}_{dc} \quad (2)$$

式中: i_{inv0} 和 v_{dc0} 为稳态分量; \tilde{i}_{inv} 和 \tilde{v}_{dc} 为小信号分量。 \tilde{v}_{dc} 远小于 v_{dc0} 。

由式(2)可知,恒功率负载表现为负阻抗特性。则小信号电阻为

$$Z_{in} = \frac{\tilde{v}_{dc}}{\tilde{i}_{inv}} = -\frac{v_{dc0}^2}{P_L} \quad (3)$$

此时可得系统特征方程为

$$s^2 + \left(\frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc0}^2} \right) s + \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 - \frac{P_L R_g}{v_{dc0}^2} \right) = 0 \quad (4)$$

记: $a_1 = \frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc0}^2}$; $a_2 = \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 - \frac{P_L R_g}{v_{dc0}^2} \right)$ 。

由式(4)可得,要使直流母线电压稳定,直流母线电容需满足

$$C_{dc} > \frac{L_g P_L}{R_g v_{dc}^2} \quad (5)$$

如果在直流母线上用薄膜电容来代替电解电容,对于处于电动状态的感应电机来说,系统很难满足式(5),此时 L_g 和 C_{dc} 会发生谐振,从而导致系统不稳定。为了抑制谐振,本文采用基于直流母线电压重构的有源阻尼法。

2 重构直流母线电压参考信号的有源阻尼法

2.1 有源阻尼法基本原理

有源阻尼法其基本思想是:通过在电压源和直流母线电容间添加一个虚拟阻尼电阻(R_{damp}),以此来增加系统阻尼,进而控制从直流母线输出的实际功率,实现正动态阻尼系数。虚拟电阻的实现可以通过向逆变器注入额外的电流(i_{damp}),记 $i'_{inv}=i_{inv}+i_{damp}$ 。注入阻尼电流的大小为

$$i_{damp} = \frac{v_{dc} - v_{in}}{R_{damp}} \quad (6)$$

此时,系统特征方程由式(4)变为

$$s^2 + \left(\frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc}^2} + \frac{1}{C_{dc} R_{damp}} \right) s + \frac{1}{L_g C_{dc}} \cdot \left(\frac{R_g}{R_{damp}} v_{dc0} - \frac{P_L R_g}{v_{dc0}} + v_{dc0} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\text{记: } b_1 = \frac{R_g}{L_g} - \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc}^2} + \frac{1}{C_{dc} R_{damp}};$$

$$b_2 = \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(\frac{R_g}{R_{damp}} v_{dc0} - \frac{P_L R_g}{v_{dc0}} + v_{dc0} \right)。$$

由式(7)可得系统稳定性条件为

$$C_{dc} > \frac{L_g}{R_g} \left(\frac{P_L}{v_{dc}^2} - \frac{1}{R_{damp}} \right) \quad (8)$$

2.2 直流母线电压重构的有源阻尼法原理

在式(4)和式(7)中,系数 $a_1(b_1)$ 和 $a_2(b_2)$ 会随着工作条件和系统参数的变化而变化,因此注入的阻尼电流(电压)必须进行实时调整。针对此问题,可以通过有源阻尼法,通过将负阻抗(Z_{inv})变为正阻抗实现系统稳定^[4]。比如,简单地改变式(3)中 \tilde{v}_{dc} 的符号就可以达到目的。该方法的思想是改变控制算法中的直流母线电压参考信号 v_{dc}^* 。

在 SDCDS 中,记 \mathbf{v}_{abc} 和 \mathbf{i}_{abc} 分别表示电机的电

压矢量和电流矢量,则负载功率可表示为

$$P_L = \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} \quad (9)$$

当直流母线电压参考信号 v_{dc}^* 由 $v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}$ 变为 $v_{dc0} - \tilde{v}_{dc}$ 时,可以得到输出电压矢量为

$$\mathbf{v}_{abc,rec} = \frac{\mathbf{v}_{abc}}{v_{dc}^*} v_{dc} = \mathbf{v}_{abc} \frac{v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}}{v_{dc0} - \tilde{v}_{dc}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得负载功率为

$$P_{L,rec} = \mathbf{v}_{abc,rec} \cdot \mathbf{i}_{abc} = \frac{v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}}{v_{dc0} - \tilde{v}_{dc}} P_L \quad (11)$$

将式(11)代入式(2)得逆变器输入电流为

$$i_{inv} = i_{inv0} + \tilde{i}_{inv} = \frac{P_{L,rec}}{v_{dc}} = P_L \frac{v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}}{v_{dc0} - \tilde{v}_{dc}} \frac{1}{v_{dc0} + \tilde{v}_{dc}} = \frac{P_L}{v_{dc0} - \tilde{v}_{dc}} \approx \frac{P_L}{v_{dc}} + \frac{P_L}{v_{dc}^2} \tilde{v}_{dc} \quad (12)$$

此时负载阻抗变为了正数,则系统的状态方程为

$$s^2 + \left(\frac{R_g}{L_g} + \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc}^2} \right) s + \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 + \frac{P_L R_g}{v_{dc}^2} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\text{记: } c_1 = \frac{R_g}{L_g} + \frac{P_L}{C_{dc} v_{dc}^2}; c_2 = \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 + \frac{P_L R_g}{v_{dc}^2} \right)。$$

系数 c_1 和 c_2 总是大于 0,因此系统是稳定的。

引入一个因数 k_v ,使得 $v_{dc}^* = v_{dc0} - k_v \tilde{v}_{dc}$,可得到

$$s^2 + \left(\frac{R_g}{L_g} + \frac{k_v P_L}{C_{dc} v_{dc}^2} \right) s + \frac{1}{L_g C_{dc}} \left(1 + \frac{k_v P_L R_g}{v_{dc}^2} \right) = 0 \quad (14)$$

通过式(14)可以发现,增加 k_v 可以增加阻尼系数,此时诸如 \tilde{v}_{dc} 等扰动量可以得到显著抑制。缺点是此时更多的振荡能量将输入到电机中,影响系统性能。因此需兼顾两者,选取合适的 k_v 。

3 实验验证

为验证本文设计的有源阻尼方法,搭建了实验平台。实验的系统控制框图如图3所示,逆变器和控制电路实物如图4所示,控制算法通过数字控制芯片 DSP28069 实现。控制对象为 3hp (2.2 kW)、380 V、50 Hz、2 对极的三相鼠笼式异步感应电机,直流电机负载,负载大小通过直流电机控制柜调节,其实验平台如图5所示,实验平台主要参数如表1所示。

当系统未加入有源阻尼时,直流母线电压 v_{dc}

和网侧电流波形如图 6 所示。由图可见,其中包括 2 个频率的波动,除了三相不可控整流引入的 6 倍工频纹波外,还存在由网侧电感 L_g 和直流母线电容

C_{dc} 引起的谐振分量。加入直流母线电压重构有源阻尼法后,直流母线电压 v_{dc} 的谐振分量明显减小,谐振分量得到有效抑制,网侧电流的功率因数也得到了提高,如图 7 所示。

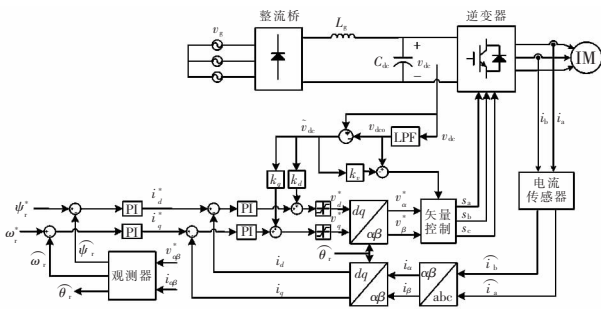


图 3 SDCDS 控制框图

Fig.3 Control block diagram of SDCDS

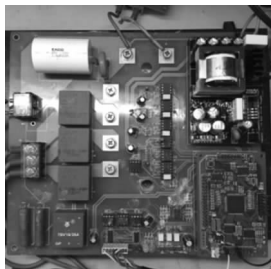


图 4 3 hp(2.2 kW)实验平台控制板

Fig.4 Control panel of 3 hp(2.2 kW) experimental platform

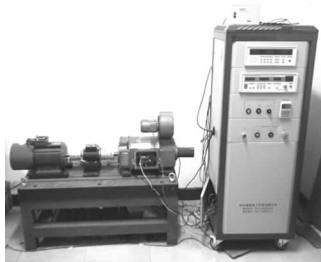


图 5 3 hp(2.2 kW)三相感应电机和直流电机负载实验平台

Fig.5 Experimental platform of 3 hp (2.2 kW) three-phase induction motor and DC motor load

表 1 实验平台主要参数

Tab.1 Main parameters of experimental platform

主要参数	数值
网侧三相电压有效值/V	220
网侧滤波电感 L_g /mH	6
直流母线电容 C_{dc} /μF	10
机械角频率 f_r /Hz	30
负载转矩 T_L /N·m	10

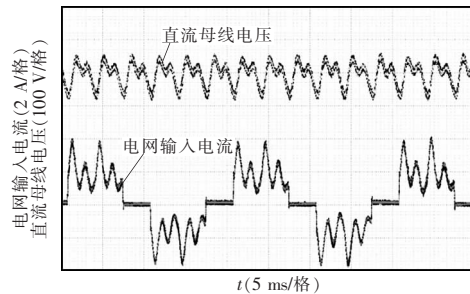


图 6 无有源阻尼时的实验结果

Fig.6 Experimental results without active damping

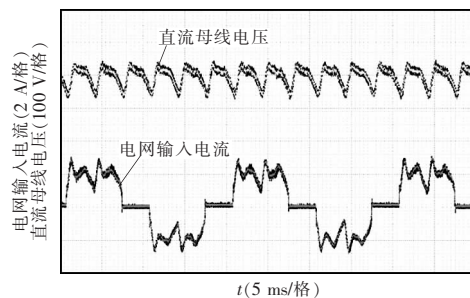


图 7 有源阻尼($k_v=2, k_d=0, k_q=0.5$)时的实验结果

Fig.7 Experimental results with active damping ($k_v=2, k_d=0, k_q=0.5$)

4 结语

本文针对 SDCDS 系统,对其稳定性问题进行了理论分析。在此基础上,采用基于直流母线电压重构的有源阻尼法,有效地抑制了由网侧电感和直流母线电容引起的谐振分量,解决了系统稳定性问题。最后通过实验验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] Imam A M, Habetler T G, Harley R G, et al. Condition monitoring of electrolytic capacitor in power electronic circuits using adaptive filter modeling[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2005: 601-607.

[2] Chen X, Kazerani M. Space vector modulation control of an AC-DC-AC converter with a front-end diode rectifier

- and reduced DC-link capacitor[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2006, 21(5): 1470-1478.
- [3] Lee K, Jahns T M, Venkataramanan G, et al. DC-bus electrolytic capacitor stress in adjustable-speed drives under input voltage unbalance and sag conditions[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2007, 43(2): 495-504.
- [4] Yoo H, Sul S K, Jang Hoyong, et al. Design of a variable speed compressor drive system for air-conditioner without electrolytic capacitor[C]. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007: 305-310.
- [5] De Oliveira F M E, Gazoli J R, Sguarezi F A J, et al. A control method for voltage source inverter without dc link capacitor[C]. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008: 4432-4437.
- [6] Hinkkanen M, Luomi J. Induction motor drives equipped with diode rectifier and small DC-link capacitance [J]. IEEE Transaction on Industry Electronics, 2008, 55(1): 312-320.
- [7] Maheshwari R, Nielsen S M, Monge S B. EMI performance comparison of two-level and three-level inverters in small dc-link capacitors based motor drives[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012: 652-657.
- [8] Kim J S, Sul S K. New control scheme for AC-DC-AC converter without DC link electrolytic capacitor[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1993: 300-306.
- [9] Cespedes M, Beechner T, Xing L, et al. Stabilization of constant-power loads by passive impedance damping[C]. Annual IEEE Conference on Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 2010: 2174-2180.
- [10] Zimmermann M, Kuskov A, Piepenbreier B. Model-based voltage calculation for inverters with small DC-link capacitance[C]. IEEE Electric Drives Production Conference (EDPC), 2011: 243-248.
- [11] Aban V V, Hava A M. Performance analysis, filter component sizing, and controller structure selection of small capacitor diode rectifier front end inverter drives[C]. International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition(PEMC), 2014: 745-750.
- [12] Pietilainen K, Harnefors L, Petersson A, et al. DC-link stabilization and voltage sag ride-through of inverter drives [J]. IEEE Transaction on Industry Electronics, 2006, 53(4): 1261-1268.
- [13] Lee W J, Sul S K. DC-link voltage stabilization for reduced DC-link capacitor inverter[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2014, 50(1): 404-414.
- [14] Wang Dong, Lu Kaiyuan, Rasmussen P O, et al. Analysis of voltage modulation based active damping techniques for small DC-link drive system[C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), 2015: 2927-2934.



陈发毅

作者简介:

陈发毅(1992-),男,硕士研究生,研究方向:感应电机控制系统设计,E-mail:chen_fayi@163.com。

钱振天(1993-),男,中国电源学会会员,硕士研究生,研究方向:感应电机控制系统设计,E-mail:1141676578@qq.com。

姚文熙(1977-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,副教授,研究方向:电力电子数字控制等,E-mail:ywxi@zju.edu.cn。

吕征宇(1957-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:电力电子功率变换及其数字控制等,E-mail:eeluzu@cee.zju.edu.cn。