

一种大功率交流恒流源的设计

孙传杰, 田凯, 楚子林, 杨敬然, 张中磊

(天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

摘要: 针对某些低压电气设备需要对特定电流的热效应进行严格测试的需求, 设计了一种具有多种运行模式的大功率交流恒流源装置。该恒流源装置采用多组逆变H桥共直流母线的电路拓扑, 以矢量控制作为核心算法, 根据不同的测试需求, 可选择不同的运行模式, 包括单相独立运行模式、单相并联运行模式以及三相运行模式。经过实验验证, 所提出的具有多种运行模式的恒流源完全可以满足不同类型低压电气设备的测试需求, 并且基于矢量控制理论的控制策略使该恒流源装置实现可靠高效运行, 获得了低谐波、高精度的输出电流, 具有广阔的应用范围和市场前景。

关键词: 恒流源; 逆变H桥; LCL滤波器; 矢量控制

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22030

Design of High Power AC Constant Current Source

SUN Chuanjie, TIAN Kai, CHU Zilin, YANG Jingran, ZHANG Zhonglei

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: For some low-voltage electrical equipment that requires strict testing of the thermal effects of specific currents, a high power AC constant current source with multiple operating modes was designed. The constant current source adopts the circuit topology of multiple sets of H-bridge inverter common DC bus, and uses vector control as the core algorithm, according to different test requirements, different operation modes can be selected, including single-phase operation in independence, single-phase operation in parallel and three-phase operation. Experimental results demonstrate that the constant current source can meet the testing needs of different types of low-voltage electrical equipment, the control strategy based on vector control theory enables the constant current source to operate reliably and efficiently, and obtains low harmonic, high-precision output current, the constant current source has a wide range of applications and market prospects.

Key words: constant current source; H-bridge inverter; LCL filter; vector control

交流恒流源被广泛应用于低压电气设备的型式试验, 当前市场份额基本被国内产品占据。应用较广泛的电工电源主要有两种方式^[1-2]: 一种是通过多级变压器和补偿器的方式; 另一种是利用粗调调压器、微调调压器以及相应的传动控制单元的方式。其控制精度受调压器以及变压器的制作工艺精度影响很大, 长时间运行发热严重, 故障率高。

在数字化电流源方面, 文献[3]利用微控制器LPC1768对单个逆变系统进行控制, 滤波回路设计过于简单, 输出电流谐波含量较大。文献[4]采

用三电平电路结构, 理论上三电平电路结构可以提高输出电压的质量, 但其滤波器连接在升流变压器的次级, 当电流较大时, 不利于滤波器的设计, 并且三电平电路结构成本较高, 不利于市场竞争。文献[5]对三相电流源逆变器进行了数学建模与分析, 推导了数学模型, 对逆变器相关参数的设计提出了理论依据。文献[6-7]对LCL滤波器进行了优化设计, 对谐振抑制效果和动、静态性能进行了分析。文献[8-9]介绍了不同逆变器并联均流方法的概况, 并对并联均流方法进行了仿真和实验验证。

基金项目: 天津电气院科研开发创新基金(GE2017ZL002)

作者简介: 孙传杰(1988—), 男, 硕士, 工程师, Email: sun_c_j@126.com

针对恒流源市场的实际需求,为了提高恒流源的技术指标和各类试验的测试效率,本文采用逆变H桥进行模块化设计,利用矢量变换核心算法实现精确控制,LCL滤波回路降低电流谐波,主从控制法提高并联运行可靠性,设计了一款具有多种运行模式的高精度数字化恒流源。

1 电路原理

该恒流源电路原理如图1所示,包括二极管整流器、直流母线电容、逆变H桥、滤波回路以及降压升流变压器。其中3组逆变H桥采用共直流母线连接,3组逆变H桥输出经过降压升流变压器后,作为恒流源的输出端。

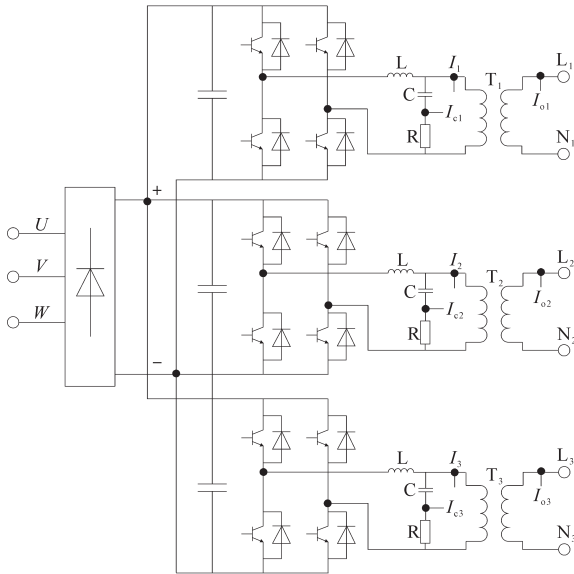


图1 电路原理图

Fig.1 Diagram of the circuit

1.1 锁相环

锁相环PLL^[10]原理框图如图2所示。

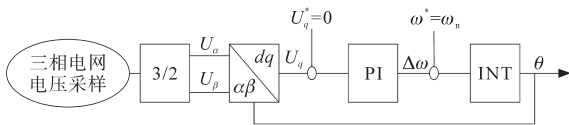


图2 锁相环

Fig.2 Phase-locked loop

图2中,3/2变换指三相静止 abc 坐标系到两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系的变换,变换公式为

$$\begin{cases} U_\alpha = U_a \\ U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}U_a + \frac{2}{\sqrt{3}}U_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_a, U_b 分别为三相静止坐标系下的 a 相、 b 相电网电压; U_α, U_β 分别为电网电压在两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的 α, β 轴电压。

Park变换将两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电网电压转换成同步旋转 $d-q$ 坐标系下的直流量,其矢量变换关系如图3所示。

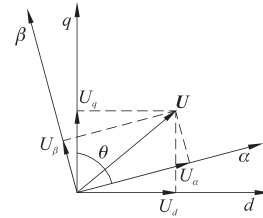


图3 矢量变换

Fig.3 Vector transformation

由图3可得Park变换公式为

$$\begin{cases} U_d = U_\alpha \sin\theta - U_\beta \cos\theta \\ U_q = U_\alpha \cos\theta + U_\beta \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_d, U_q 分别为电网电压在同步旋转 $d-q$ 坐标系下 d, q 轴分量。

实际电网电压矢量以同步旋转坐标系下的 d 轴定向,显然,通过闭环调节使 $U_q=0$,则矢量 U 与 U_d 重合,即可完成锁相。

1.2 无源阻尼法与有源阻尼法

图1所示电路原理图中,LC滤波回路与升流降压变压器的漏感 L_σ 组成LCL滤波器,LCL滤波器具有非常好的低通滤波特性,并且相对于L滤波器来说,设计较小的电感就可以满足输出谐波的要求。但由于LCL自身的谐振特性有可能影响系统的稳定特性^[11-12],特别是当多组逆变H桥并联输出时,提高整个系统的稳定性尤为重要。本文将采用无源阻尼法和有源阻尼法来增加系统阻尼,从而提高系统稳定性和控制精度。

典型LCL滤波器电路如图4所示。根据图4可获得输出电流与逆变侧电压的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{LL_\sigma Cs^3 + (L + L_\sigma)s} \quad (3)$$

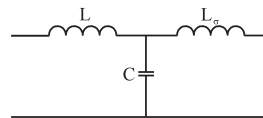


图4 典型LCL滤波器

Fig.4 Typical LCL filter

本文采用的无源阻尼法为电容支路串联电阻的方式,电路原理图如图5所示。

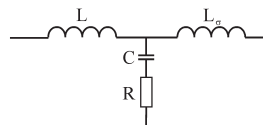


图5 无源阻尼法

Fig.5 Passive damping

根据图5可获得输出电流与逆变侧电压的传递函数为

$$G(s) = \frac{CRs + 1}{LL_\sigma Cs^3 + CR(L + L_\sigma)s^2 + (L + L_\sigma)s} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)绘制伯德图,分别如图6和图7所示。

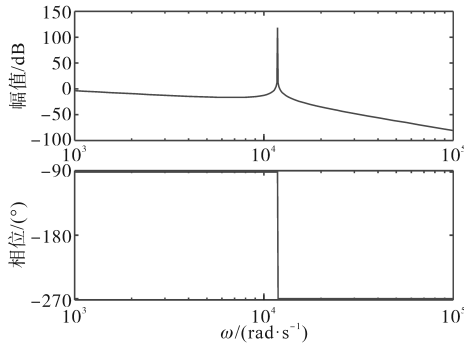


图6 典型LCL滤波器的伯德图

Fig.6 Bode diagram of typical LCL filter

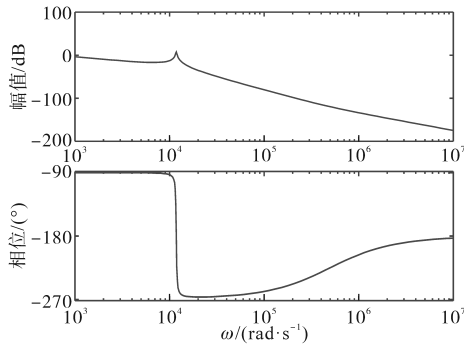


图7 无源阻尼LCL滤波器的伯德图

Fig.7 Bode diagram of passive damping LCL filter

对比图6和图7可知,LCL滤波器存在谐振点处系统不稳定的情况,无源阻尼法可以对系统中的谐振进行衰减或抵消,使系统在谐振频率处的增益处于0 dB以下,改善了系统稳定性。并且由于阻尼电阻的存在,滤波器表现出更好的高频滤波特性,能够使输出电流高频分量大大衰减。但由于阻尼电阻带来一定的损耗,所以采用较小的阻尼电阻即可。

有源阻尼法的控制思想是利用霍尔传感器检测LCL滤波器中电容支路上的电流 I_c ,反馈到电流环的输入电流指令上,从而模拟阻尼电阻的效果,在无源阻尼法中电阻损坏不大的前提下,进一步利用有源阻尼法使系统在谐振频率处的增益降低,提高系统稳定性。

1.3 控制策略

在上文所述阻尼控制的基础上,以矢量控制为核心,并采用负载电流前馈的控制方法组成该

恒流源装置的整体控制思路。以其中一组逆变H桥的控制为例进行分析,逻辑框图如图8所示。

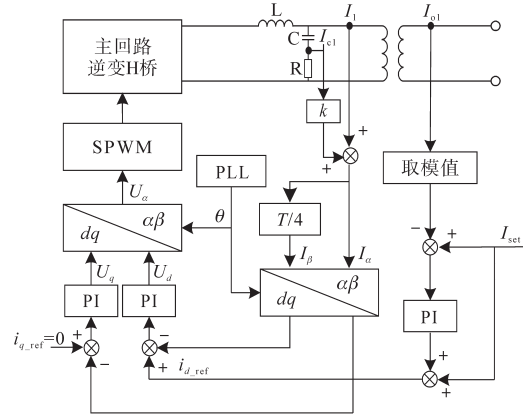


图8 控制逻辑图

Fig.8 Diagram of control logic

有源阻尼法获得 I_α 后,经过延时1/4个电流周期(电流周期设为 T),构建两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电流 I_α 和 I_β ,对 I_α 和 I_β 进行Park变换得到同步旋转 $d-q$ 坐标系下的直流量,并进行相互独立控制,实现对电流环的解耦,再经过Park逆变换,获得两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的电压 U_α 和 U_β ,以 U_α 作为给定电压经过SPWM调制,最终控制逆变H桥中开关管的开通与关断。与此同时,输出电流的给定 I_{d_ref} 采用负载电流前馈的控制方法^[13],通过将负载电流叠加到电流给定,加快逆变电压对负载突变的响应速度。利用恒流源当前输出电流 I_{o1} 的峰值作为给定电流的前馈量,并与输出电流设定值 I_{set} 进行PI调节,当改变输出电流设定时,由于负载电流响应滞后,此时PI调节器提高给定电流的响应,当系统输出电流恒定时,该PI调节器输出为0。

2 不同输出模式的连接方式

2.1 单相独立模式输出

单相独立模式输出时,3组交流输出之间互不影响,可任意运行其中1组、2组或者3组独立输出,采用上文所述控制方法分别独立控制,恒流源输出端与负载的电气连接如图9所示。其中, Z_{load} 表示负载,可以是阻性负载、感性负载或容性负载。

2.2 并联输出连接方式

当单相输出电流较小而不能满足某负载的测试需求时,可3组并联输出更大的测试电流,其连接方式如图10所示。

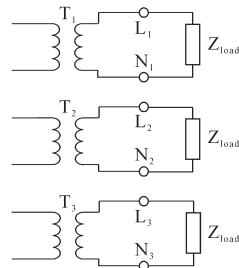


图9 单相独立输出模式电气连接图

Fig.9 Electrical connection diagram of single-phase independent output mode

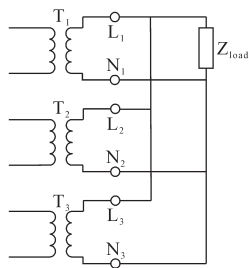


图10 并联输出模式电气连接图

Fig.10 Electrical connection diagram of parallel output mode

当并联运行时,由于主回路参数的差异性会引起三相输出电流不平衡问题。并联均流技术中的主从控制法在整流器和逆变器并联中使用非常广泛,本文所设计的3组逆变输出共用1块控制板同时生成驱动脉冲,软件程序即可实现各组逆变H桥之间通讯,省略常规光纤通讯成本,更有利于主从控制法的运用,提高系统稳定性。

如图11所示,以第1组作为主站,另2组作为从站,将主站的输出电流作为各从站输出电流的给定,利用电流差值进行PI调节,其输出作为各组控制逻辑中的电流给定。当主站输出电流变化时,各从站的电流给定也就随之变化,最终实

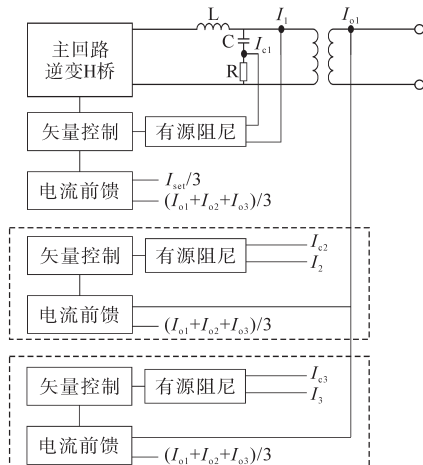


图11 并联输出模式控制框图

Fig.11 Control diagram of single-phase operation in parallel

现并联均流。与此同时,平均电流前馈^[14]使每一组逆变输出统一化,降低各组输出回路参数差异对并联电压和电流的影响。

2.3 三相负载连接方式

恒流源与三相负载的电气连接如图12所示,如果依然按照三相分别独立调节,三相给定电压将有可能逐渐发生偏移,造成三相电压不平衡而逐渐失控,这是因为三相负载的差异性造成的。

在实际工况中,为提高系统稳定性,对任意三相负载均视为不对称负载进行控制。根据三相负载电流和为零的原则,将C相的电流不做闭环调节,C相电压给定改为 $0-U_A-U_B$,并且A相控制环节中Park变换的角度取 θ ,B相控制环节中Park变换的角度取 $\theta-120^\circ$ 。

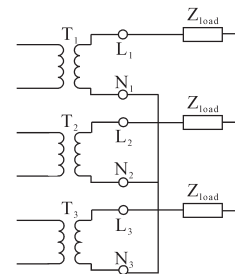


图12 三相输出模式电气连接图

Fig.12 Electrical connection diagram of three-phase output mode

3 实验与结论

为验证上文所述技术方案的有效性,设计一台总功率60 kW的恒流源装置,其技术要求为:单相额定输出电流有效值2 000 A(允许轻度过载,峰值3 000 A);电流输出全范围内电流总谐波畸变率 $\leq 3\%$,额定状态下电流总谐波畸变率 $< 1\%$;额定电流下电流偏差 $< 0.2\%$;输出电流相位控制精度 $\leq 1^\circ$;具有多种运行模式,可满足不同负载需求。

硬件参数如下:每相逆变H桥的直流母线电容值为4 700 μF ,IGBT采用英飞凌FF150R12RT4,滤波回路 $L=600 \mu\text{H}$, $C=20 \mu\text{F}$, $R=0.1 \Omega$,变压器漏感5%。

软件参数如下:核心算法由数字控制器DSP完成,软件算法控制周期125 μs ,载波频率8 kHz,利用SPWM倍频调制技术,最终实现电流高精度稳定输出。

恒流源装置实物如图13所示,其中液晶屏用于电流设定、数据查看以及故障记录等,并且具备远程通讯功能。

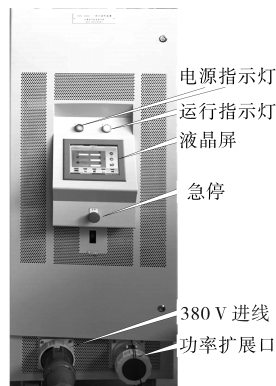


图13 恒流源装置实物图

Fig.13 Physical map of the constant current source

采用三相运行方式,输出最大电流时,三相输出电流 I_A, I_B, I_C 波形如图14所示。对不同等级的输出电流利用电能质量分析仪进行分析,电流总谐波畸变率不高于3%,测试数据如表1所示;对该恒流源装置的最大输出电流进行各次谐波电流含量分析,分析数据如表2所示。

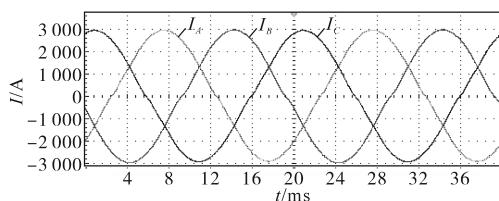


图14 三相输出电流波形

Fig.14 Current waveforms of three-phase operation

表1 总谐波电流分析

Tab.1 Analysis of total harmonic current

电流峰值/A	电流总谐波畸变率/%		
	I_A	I_B	I_C
300	2.51	2.89	2.47
1 000	1.82	1.18	0.83
2 000	0.50	0.43	0.46
3 000	0.68	0.63	0.55

表2 谐波电流分析

Tab.2 Analysis of harmonic current

谐波次数	各次谐波电流含有率/%			谐波次数	各次谐波电流含有率/%		
	I_A	I_B	I_C		I_A	I_B	I_C
2	0.46	0.4	0.44	14	0.03	0.03	0.03
3	0.42	0.39	0.19	15	0.03	0.03	0.03
4	0.13	0.12	0.13	16	0.03	0.03	0.03
5	0.11	0.17	0.13	17	0.03	0.03	0.03
6	0.08	0.08	0.08	18	0.02	0.02	0.03
7	0.12	0.1	0.09	19	0.03	0.02	0.03
8	0.06	0.06	0.06	20	0.02	0.02	0.02
9	0.06	0.07	0.06	21	0.02	0.02	0.02
10	0.04	0.04	0.05	22	0.02	0.02	0.02
11	0.05	0.07	0.05	23	0.02	0.02	0.02
12	0.04	0.04	0.04	24	0.02	0.02	0.02
13	0.03	0.04	0.04	25	0.02	0.02	0.02

根据实际市场需求,结合先进的控制方法,设计了一种大功率交流恒流源装置,其优点如下:优化LCL滤波器的设计,抑制了系统谐振,提高了系统稳定性,并且大大降低了输出电流的谐波含量;利用矢量控制以及电流前馈的方法,提高了装置的调节速度和输出精度;设计并联均流方案,提高了装置运行的稳定性和带载能力;可根据负载不同,选择不同的工作模式,且恒流源的输出特性不受负载的影响,提高了恒流源装置的应用范围。

该大功率交流恒流源装置具备锁相功能,具有可扩展性,可实现任意多相输出的冗余设计,具有极高的实用价值。

参考文献

- [1] 孙世军. 大电流发生装置及系统:中国, CN206422528U[P]. 2017-08-18.
- [2] 王炳林, 郭巍, 郭永敏, 等. 一种程控交流恒流电源:中国, CN202975885U[P]. 2013-06-15.
- [3] 赵琛, 张益, 裴方晟, 等. 基于SPWM调制的交流恒流源系统设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(11):165-169.
- [4] 樊二珂. dsPIC控制的大功率恒流源的研究[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
- [5] 申中鸿, 杨林, 蒋春旭. 一种电流源型三相逆变器模型[J]. 电气自动化, 2014, 36(5):12-14, 50.
- [6] Saleem Muhammad, Choi Ki-Young, Kim Rae-Young. Resonance damping for an LCL filter type grid-connected inverter with active disturbance rejection control under grid impedance uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 109:444-454.
- [7] 杨睿, 王伟, 汪阳, 等. 并网型逆变电源LCL滤波器的优化设计[J]. 新型工业化, 2019, 9(9):1-8.
- [8] 刘良. 并联逆变器的控制策略研究[D]. 太原:山西大学, 2019.
- [9] 夏鲲, 陈昂辉, 李正荣, 等. 逆变器多机并联系统双闭环有源阻尼谐波抑制[J]. 电气传动, 2018, 48(8):17-20.
- [10] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012:256-271.
- [11] 黄羽西. 有源前端LCL滤波器的谐振抑制技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- [12] Kato Toshiji, Inoue Kaoru, Nakajima Yusuke, et al. Design of passivity-based stabilized control of grid-connected inverter system with LCL filter[J]. Electrical Engineering in Japan, 2019, 207(2):49-58.
- [13] 赵兴国, 董钺, 郭培健, 等. 离网逆变器负载电流直接前馈控制方法的研究[J]. 电气传动, 2018, 48(7):18-22.
- [14] 王明玥, 温金鑫, 于洪泽, 等. 一种高频开关电源系统的并联均流控制方法[J]. 电气传动, 2019, 49(1):68-71, 82.

收稿日期:2020-06-09
修改稿日期:2020-07-01