

逆变器并网用三相电抗器设计

王建刚¹, 陈 为^{1,2}, 曾 平¹, 于晓强¹

(1.青岛云路新能源科技有限公司, 青岛 266000; 2.福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要:针对可再生能源逆变器需要并网运行以实现大功率电能输出的特点,通过分析现用逆变器的并网用滤波电抗器,提出了一种新型的兼具有共模电流抑制效果的三相五柱电抗器方案,在保证各相电路的差模感量的同时,通过解耦磁集成的方法,使三相电抗器的零序电抗大大增加。应用在逆变器并网系统中,可减少电路中的滤波电抗器的数量,改善系统的电路结构,减少逆变器的成本,具有较大的实际应用价值。

关键词:太阳能逆变;三相五柱电抗器;零序电抗

Three-phase Reactors Designed for Parallel Connected Inverters

WANG Jiangang¹, CHEN Wei^{1,2}, ZENG Ping¹, YU Xiaoqiang¹

(1.Qingdao Yunlu Energy Technology Co. Ltd., Qingdao 266000, China; 2.College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In this paper, proposed a new three-phase reactor having the common mode current suppression effect, working in renewable energy power inverters which need to work in parallel to achieve a power output, in order to achieve high power output. The scheme making the three-phase reactor's zero sequence reactance greatly increased by the magnetic integrated approach while ensuring the differential mode inductance of each phase. The reactor used in the inverter system which need to work in parallel, can reduce the number of filter reactors, improve the system's circuit configuration, reduce the inverter's cost, have a great practical value.

Keywords: solar inverter; three-phase five-limb reactor; zero-sequence reactance

基于可再生能源(如风能、太阳能等)的分布式发电技术是人类应对能源危机与解决环境污染的重要手段之一,近年来受到广泛重视。随着我国新能源产业的逐步发展,风力、光伏发电系统的容量也逐渐增加。

单个并网逆变器已经不能满足风力、光伏发电的容量要求,因此,实现逆变器并联输出得到了广泛的研究。在参与并联的每个逆变器输出瞬时电压严格相等的情况下,并联系统内部理论上不存在环流,但是,由于构成逆变器的功率器件本身存在的触发延时差异等因素的存在,在各逆变器控制中即使使用同步控制信号,实现各逆变器输出瞬时电压

严格一致也十分困难,因此,在实际应用中,逆变器并联系统中环流是普遍存在的。为了并联系统的稳定性,抑制环流已成为实现并联控制的关键问题^[1-4]。

目前,并联环流的抑制方法主要集中在通过优化控制算法,保证各并联逆变器的输出一致,为了实现精准控制需要精密的检测元件、反馈系统、控制及驱动系统^[3],导致逆变器的控制系统变得冗杂,成本、体积都相应地增大。而采用增加零序电抗的方法则可在保证控制系统不变的情况下获得更好的并联效果,但增加零序电抗意味着逆变器成本和体积的增加^[5]。本文将通过磁集成技术,在不增加体积的情况下,将共模(零序)电抗集成到逆变电抗中。

1 并网逆变器并联运行的系统模型

1.1 系统模型

以由两台 125 kW 三相逆变器并机组成的 250 kW 光伏逆变系统为例,其常用的结构框图如图 1 所示。其中三相逆变电路采用多电平逆变拓扑,滤波器采用 LCL 型滤波器,为了保证滤波器有足够的零序电抗,前级滤波电抗器需要采用 3 个独立的单相铁硅粉芯电抗器组成;后级滤波电抗器由于电流谐波较少,可以采用价格相对便宜的三相硅钢电抗器^[6]。

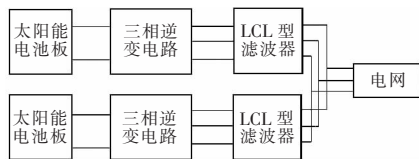


图 1 250 kW 并机式光伏逆变系统结构框图

Fig.1 Structure block diagram of 250 kW photovoltaic inverter system with parallel mode

1.2 三相五柱电抗器结构

由于前级滤波电抗器采用 3 个独立的单相铁硅粉芯电抗器组成,逆变器内部需要很多的连接结构,导致系统结构复杂,体积、成本相应增加。而采用铁硅粉芯材质作三相电抗器的磁芯,其 3 个线圈各自漏感也可构成零序电抗,其漏磁通主要由横穿过磁芯柱的旁路磁通组成,如图 2 所示。而旁路磁通增大会使正序感量降低,正序谐波的抑制效果减弱;同时旁路磁通会穿过电感线圈,导致绕组涡流损耗的增加,对电抗器的效率、温升都会产生明显

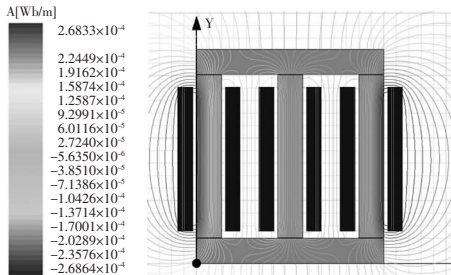
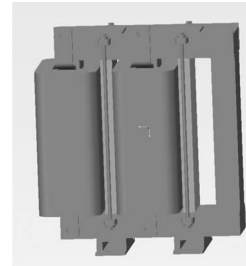


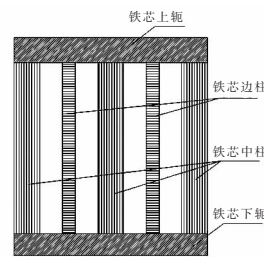
图 2 三相三柱式电抗器通入零序电流时磁链分布
Fig.2 Flux distribution of three-phase three-limb reactors in the zero sequence current

的影响^[7,8]。

为了保证三相电抗器具有足够的零序电抗器,在三相磁柱之外增加 2 个磁柱,构成三相五柱式的电抗器,其产品结构及铁芯结构如图 3 所示。



(a) 产品



(b) 铁芯

图 3 三相五柱式电抗器产品及铁芯结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the three-phase five-limb reactor reactor and its core

2 三相五柱电抗器方案设计

2.1 电抗器技术要求

具有零序感抗的该三相五柱式电抗器的技术要求如下:额定电压为 400 Vac;额定电流为 216 Aac;零序电流为 60 A(峰峰值),8 kHz;初始感量为 230 μH;额定感量为 100 μH,305 Adc;零序感抗为大于 200 μH;额定频率为 50 Hz;开关频率为 9 kHz;谐波含量约为 30%;逆变器拓扑为三电平逆变电路;产品尺寸为 380 mm × 200 mm × 400 mm。

2.2 电抗器方案演算

铁芯选型:根据三相电抗器的经验公式及电抗器尺寸的要求,选定铁芯为相对磁导率 60 的铁硅粉芯,铁芯柱截面为 40 mm × 75 mm,高度为 260 mm,铁芯轭尺寸为 40 mm × 75 mm × 300 mm,边柱尺寸为 20 mm × 75 mm × 260 mm,磁密为 6 000 Gs。

绕组选定:根据额定电流及其谐波的含量选定

绕组为铝箔,截面为 $0.8 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$ 。

匝数选定:根据电流、感量、磁密、截面积算得匝数为 25 匝^[9]。

电抗器各部分的磁阻计算公式为

$$R_x = \frac{h_x}{u_0 u_c A_{ex}} \quad (1)$$

式中: R_x 为磁柱的磁阻; h_x 为对应磁柱的磁路长度,非磁柱本身的长度; u_0 为真空磁导率; u_c 为磁性材料的相对磁导率; A_{ex} 为磁柱的磁路截面积。

根据铁硅粉芯的特性,磁导率与磁场强度的关系拟合曲线为

$$u(\text{Ha}) = 6.000 \times 10^{-6} \text{Ha}^2 - 3 \times 10^{-9} \text{Ha}^3 - 0.004 \text{Ha} + 1 \quad (2)$$

式中, Ha 为磁柱中的磁场强度。

代入安培环路定理,即

$$NI = Hl \quad (3)$$

式中: N 为电抗器的线圈匝数; I 为电抗器的输入电流; H 为磁芯的磁场强度; l 为磁路长度。

可得铁芯的磁路磁场强度与电抗器电流的关系,从而获得铁芯各部分的磁场强度。

根据磁阻公式(1),核算通入峰值电流后磁路各部分的磁阻,即

$$R_x(\text{Ha}) = \frac{h_x}{u_0 u_c u(\text{Ha}) A_{ex}} \quad (4)$$

则可得峰值电流下电感为

$$L(\text{Ha}) = \frac{N^2}{R_x(\text{Ha}) + R_c(\text{Ha}) + R_g} \quad (5)$$

式中: $R_x(\text{Ha})$ 为电抗器铁芯柱在磁场强度为 Ha 时的磁阻; $R_c(\text{Ha})$ 为电抗器铁芯轭在磁场强度为 Ha 时的磁阻; R_g 为气隙处的磁阻。

计算得峰值电流下电感 L_{lr} 为 $120 \mu\text{H}$, 满足设计要求。但由于边柱的磁阻和单个中柱的磁阻相等,且三相零序电感为并联关系,其耦合系数约为 0.93,所以零序感抗只有 $108 \mu\text{H}$,远低于设计要求。

零序感抗的大小与零序感抗磁路的磁阻成负相关,而中柱的磁阻决定了正序感抗的大小,不能随意更改,所以只能尽量减小边柱的磁阻,而边柱的长度受限于中柱的高度,不能减小;增大边柱截

面积会导致边柱体积明显增大,综上所述增大边柱铁芯的磁导率成了最优的选择。考虑到零序电流为 60 A ,频率为 8 kHz ,根据磁性材料的损耗和衰减特性,选择 B23P090 的取向硅钢片作为边柱的磁性材料^[10,12]。

由于取向硅钢片的相对磁导率远远大于铁硅粉芯的相对磁导率,所以在计算零序阻抗的磁阻时,边柱的磁阻可以忽略^[11],则零序感抗为

$$L_0 = \frac{L_1}{3} \times 0.93 \times 3 = \frac{230}{3} \times 0.93 \times 3 = 213.9 \mu\text{H} \quad (6)$$

计算结果符合设计要求。

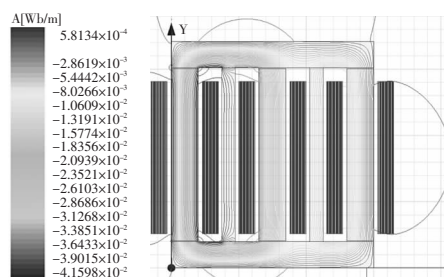
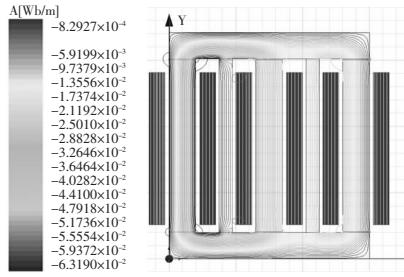


图4 全粉芯三相五柱电抗器通入正序电流时磁链分布
Fig.4 Flux distribution of three-phase five-limb reactor with powder core inputting positive sequence current

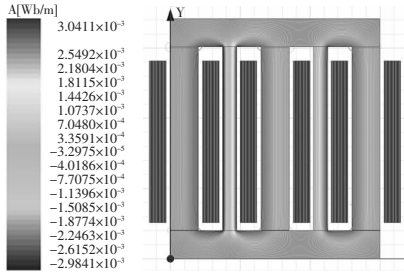
3 三相五柱磁路仿真

使用 Maxwell 对三相五柱电抗器进行建模仿真。当电抗器的磁芯都是由铁硅粉芯组成时,其磁链分布如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在铁芯柱与铁芯轭的接缝处存在较多的旁路磁通,而且这些旁路磁通有一部分直接与绕组铝箔相交,这些磁链会在铝箔内形成电阻很小的涡流,引起很大的线圈损耗。为减小旁路磁通的影响,将上下颚换成 B23P090 取向硅钢片,对其进行仿真,其磁链分布如图 5 所示。由图可见,即使在电抗器绕组中通入零序电流,气隙处的旁路磁通依然很小,减小旁路磁通引起附加损耗的同时减少了电抗器的漏磁,防止对周边的器件产生电磁干扰。



(a)正序电流时



(b)零序电流时

图 5 粉芯、硅钢混合三相五柱电抗器通入正序、零序电流时磁链分布

Fig.5 Flux distribution of three-phase five-limb reactor with powder core and silicon steel inputting positive sequence current and zero sequence current

4 成本分析

相比之前方案中采用的 3 个独立单相电抗器,三相五柱电抗器铁芯、绕组的重量,尤其是采用混合磁路型三相五柱电抗器,铁硅粉芯的用量可以减小 20%以上,替换为单价只有铁硅粉芯一半的硅钢片;线包的总体数量减少一半,省掉了用于线包间连接的端子、线包间的绝缘材料,大大简化了生产工艺,节约了人工成本;电抗器的机械固定结构减少了 30%以上,且由于上、下轭使用硅钢片,则电抗器的规定件可以使用普通碳素结构钢,不必为了避免漏磁引起的过多损耗,而使用价格昂贵、不易加工的不锈钢。

经过核算,采用混合磁路型三相五柱电抗器的

成本比采用 3 个独立单相电抗器减少 20%以上。

5 样机数据

根据以上的设计方案制作了一台样机进行了测试。经测试其输入电流与电感的关系曲线如图 6 和图 7 所示。由图 6 可见,在通入 305 A 直流电流的情况下,正序感量为 108 μH ,大于要求的 100 μH ,表明三相五柱式的正序感量完全满足要求;从图 7 可以看出,其零序电感也达到了 210 μH ,且随着输入电流的增大,零序电感基本上不发生衰减,符合设计要求;将产品安装在逆变器上测试得到,在其零序电流只用 8 A(峰峰值),而之前采用 3 个独立单相电抗器时,零序电流为 7.8 A(峰峰值),且整机效率由 98.56%上升到了 98.68%。

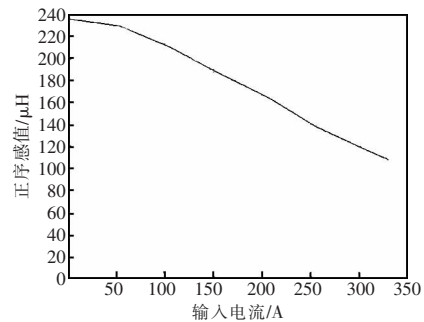


图 6 三相五柱电抗器输入电流与正序电感关系曲线

Fig.6 L-I curve of three-phase five-limb reactor which input positive sequence current

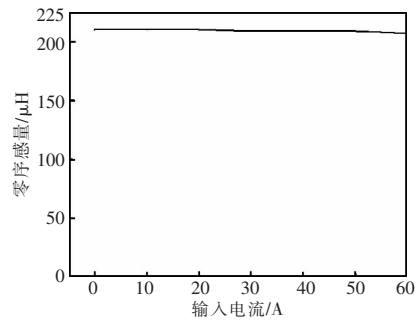


图 7 三相五柱电抗器输入电流与零序电感关系曲线

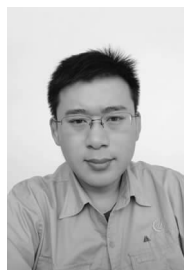
Fig.7 L-I curve of three-phase five-limb reactor which input zero sequence current

6 结语

通过仿真分析和实验测试表明,提出的三相五柱式电抗器方案可以很好地实现零序电感抗与正序电抗的集成,原理正确可行。相比于三柱式大漏感电抗器,产品参数能与系统需求精确匹配,设计过程更加简单,产品旁路磁通很少,减少了不必要的损耗,优化了电抗器周边的电磁环境;相比于之前由3个单相电抗器组成的滤波器,在达到该系统要求的零序电流抑制的情况下,其效率、成本都有较大的提升。对系统而言,其结构更加简单,省掉了大量的机械连接装置,装机更加方便,可靠性更高,占用机柜的体积更小,有利于降低大功率逆变器的成本,提高逆变器的效率和功率密度。

参考文献:

- [1] Muhlethaler J, Biela J, Kolar J W, et al. Core loss under DC bias condition based on steinmetz parameters[J]. Roc. of IPEC 2010 ECCE-Asia, 2010:2430-2437.
- [2] 李敏, 徐群. 基于 IDA-PBC 的 LCL 滤波并网逆变器控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4):50-55.
Li Min, Xu Qun. Control strategy based on IDA-PBC for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4):50-55(in Chinese).
- [3] 龙江涛, 蔡环宇, 何昕东, 等. 基于平均功率控制的中频逆变器主从并联系统研究[J]. 电源学报, 2015, 13(2):1-9.
Long Jiangtao, Cai Huanyu, He Xindong, et al. Research on master-slave paralleled middle-frequency inverters' system based on average power control strategies[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(2):1-9(in Chinese).
- [4] Mu Mingkai, Lee F C. A new high frequency inductor loss measurement method[J]. IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, 2011, 5(10):1801-1806.
- [5] 陈为, 何建农. 电力电子高频磁技术及其发展趋势[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(2):30-34.
Chen Wei, He Jianmin. Power electronics high-frequency magnetics technology and their development[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000, 19(2):30-34(in Chinese).
- [6] 杨公德, 施火泉, 吴磊, 等. 并网逆变器输出 LCL 滤波器的优化设计[J]. 电源学报, 2015, 13(1):80-86.
Yang Gongde, Shi Huoquan, Wu Lei, et al. Optimization design of output LCL filter for inverter connected-grid[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(1):80-86(in Chinese).
- [7] Mu Mingkai, Lee F C, Li Qiang, et al. A high frequency core loss measurement method for arbitrary excitations[C]. Applied Power Electronics Conference. 2011:157-162.
- [8] Sullivan C R, Harris J H, Herbert E. Core loss predictions for general PWM waveforms from a simplified set of measured data[C]. Proceedings of IEEE APEC, 2010: 1048-1055.
- [9] Seguin B, Gosse J P, Sylvestre A, et al. Calorimetric apparatus for measurement of power losses in capacitors [J]. IEEE Instrumentation and measurement Technology Conference, 1998:602-607.
- [10] Linkous R, Kelley A W, Armstrong K C. An improved calorimeter for measuring the core loss of magnetic materials [C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000: 633-639.
- [11] Brockmeyer A. Experimental evaluation of the influence of DC-premagnetization on the properties of power electronic ferrites[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996: 454-460.
- [12] Mo W K, Cheng D W K, Lee Y S. Simple approximations of the DC biasing field on the core Loss of power ferrites and their use in design of magnetic components[J]. IEEE Industry Applications Society, 1997, 2(2): 1139-1146.



王建刚

作者简介:

王建刚(1980-),男,中国电源学会会员,硕士,工程师,研究方向:新能源行业用磁性元件设计、制造,E-mail:succeed_ren@163.com。

陈为(1958-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,博士生导师,研究方向:电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容等方向,E-mail:chw@fzu.edu.cn。

曾平(1983-),男,本科,工程师,研究方向:新能源行业用磁性元件设计、制造,E-mail:xiaoping0502@126.com。

于晓强(1988-),男,中国电源学会会员,通信作者,硕士,工程师,研究方向:电力电子功率变换用磁性元件设计、制造,E-mail:yuxiaoqiang777@163.com。