

一种多脉波整流装置的研究及特性分析

面对日益增加的大功率直流电源需求,例如在机车牵引、化工电解和直流输电等应用场合,多脉波整流是提高整流质量,降低交流侧谐波注入的有效方式。针对脉波数越多、整流效果越佳,但结构愈加复杂、制作工艺要求越高的矛盾,研究并制作了基于旋转磁场理论,通过不同绕组连接获取多相电压输出满足多脉波整流需求,利用相间耦合特性进行谐波过滤的多脉波整流装置。该装置直流侧无须串并联平衡均流器件,交流侧无须加装滤波装置,即可实现直流输出平稳、交流侧电流波形正弦化好及谐波含量少等目标,并通过实验进行了验证。

卢 桥¹ 杭乃善² 卢 铭³ 苏 毅² 康海云²/1.广西电网公司玉林供电局
2.广西大学电气工程学院 3.广西玉柴机器股份有限公司



卢 桥/硕士研究生

关键词/Keywords

多脉波·
整流·
旋转磁场·
谐波过滤·

随着整流装置在日常生产生活中应用的日益广泛,其引起的谐波污染问题也得到了很多的关注和研究。其中,多脉波整流是有效降低输出端直流电压纹波幅值,提高整流输出质量,同时减少谐波电流对电网影响的措施之一^[1-3]。特别在直流输电、大型化工、机车牵引、航空和船舶等要求大功率应用的场合,多脉波整流更凸显其必要性和优势^[4, 5]。

多脉波整流装置常常采用移相变压器二次侧曲折形、多边形和延长三角形等接线方式获取多脉波,经过整流桥的串并联组合来获取直流,对制作工艺具有较高的要求,如还需在整流桥间加上平衡电抗器来实现吸收瞬时电压差、均流作用,将增加装置的复杂度和制作成本。自耦变压器降低了成本和损耗,但在一些需要电气隔离的场合应用具有一定的限制^[6]。文献[7-9]利用感应发

电机定子各相绕组的不同空间布置,来获取多相电源形成多脉波直流输出的交直流集成系统常用于舰船、航天等要求独立电源的变流系统中,对多脉波整流的发展起到很好的推动和启发作用。

寻求一种输出电压平稳、网侧谐波含量低及易于制造的多脉波整流装置将具有良好的应用意义。本文基于电动机绕组的旋转理论,利用电气旋转磁场和相间耦合方式研究并制作了具有电动机磁路结构的变压器型滤波装置,并进行了相关实验。

理论分析

1. 三相绕组的磁动势矢量分析

以整距集中绕组的2极电动机为例,三相绕组 a_1 、 b_1 和 c_1 以Y形联结,绕组匝数为 N , a_1 相绕组的线圈边分别是 A_1 和 X_1 , φ 为沿气隙位移电角度。

对于三相绕组流入的周期电流

$$\begin{aligned} i_{a1}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin n\omega t \\ i_{b1}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin n(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{c1}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin n(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

以 a_1 为参考,则 a_1 、 b_1 和 c_1 绕组分布函数的Foutier表达式^[10]如下

$$\begin{aligned} N_{a1}(\varphi) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N}{2} \left(\frac{4}{m\pi} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos m\varphi \\ N_{b1}(\varphi) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N}{2} \left(\frac{4}{m\pi} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos m(\varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ N_{c1}(\varphi) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N}{2} \left(\frac{4}{m\pi} \right) \sin \frac{m\pi}{2} \cos m(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

国家自然科学基金项目(51277034),广西研究生教育
创新计划项目(YCSZ2012026)。

用空间矢量来表示的三相绕组波形分布

$$\begin{cases} N_{a1} = \frac{2N}{m\pi} \\ N_{b1} = \frac{2N}{m\pi} e^{-j\frac{2m\pi}{3}} \\ N_{c1} = \frac{2N}{m\pi} e^{-j\frac{4m\pi}{3}} \end{cases} \quad (m=3, 5, \dots) \quad (3)$$

式中, $m=1$ 时即是基波空间矢量, 其他即为谐波的空间矢量, 则三相绕组分布的 m 次谐波矢量和 n 次谐波电流生成的磁动势可以表示为

$$\begin{aligned} F_{m,n} &= N_{am} i_{am}(t) + N_{bm} i_{bm}(t) + N_{cm} i_{cm}(t) \\ &= \frac{2N}{m\pi} \left[i_{am}(t) + i_{bm}(t) e^{-j\frac{2m\pi}{3}} + i_{cm}(t) e^{-j\frac{4m\pi}{3}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

即谐波磁动势幅值大小为

$$F_{m,n} = \frac{12}{mn\pi^2} NI \quad (5)$$

2. 多相耦合电抗器滤波原理

多相耦合变压器型滤波的典型方法是类似在多相电动机和变流器间串入多相耦合电抗器来实现滤波的功能^[11], 但需要的铁心和线圈数多, 匝数比要求高。滤波电抗器原理如图1所示。电动机和变流器间各串联一个类单相变压器的电抗器, 该变压器铁心有三个对称绕组, 确定串联绕组的同名端和匝数比 r 使得正序基波电流在铁心产生磁动势为零, 谐波电流磁动势非零, 即滤波电抗器基波电感值 $L_f(1)$ 和滤波电感值 $L_f(h)$ 有

$$\begin{cases} L_f(1) = 0 \\ L_f(h) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

要求变压器一个绕组的匝数为 N , 另外两个绕组的匝数为 rN , 且 N 匝的绕组中通过的电流必须和 rN 匝的两个绕组中通过的电流相序相邻, 则变压器 T_1, T_2, T_n 合成磁动势为

$$\begin{cases} F_1 = rNI_1 - N(I_2 + I_n) \\ F_2 = rNI_2 - N(I_3 + I_1) \\ F_n = rNI_n - N(I_1 + I_{n-1}) \end{cases} \quad (7)$$

电流关系有

$$\begin{cases} I_1 + I_1 = 2I_1 \cos \alpha \\ I_2 + I_n = 2I_1 \cos \alpha \\ I_2 + I_{n-1} = 2I_1 \cos \alpha \end{cases} \quad \left(\alpha = \frac{2\pi h}{n} \right) \quad (8)$$

则合成磁动势为

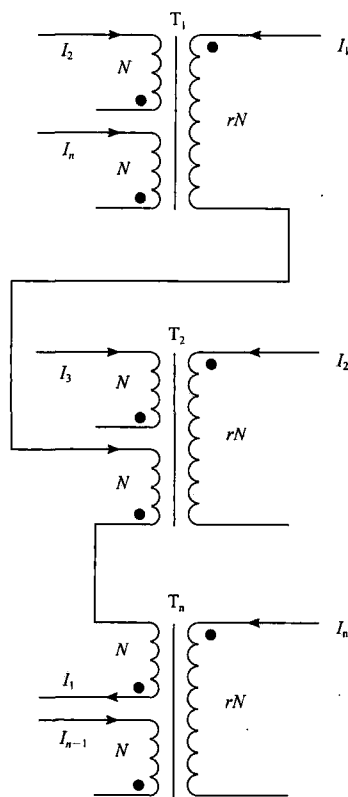


图1 n 相滤波电抗器原理

$$\begin{cases} F_1(h) = NI_1(r - 2\cos \frac{2\pi h}{n}) \\ F_2(h) = NI_2(r - 2\cos \frac{2\pi h}{n}) \\ F_n(h) = NI_n(r - 2\cos \frac{2\pi h}{n}) \end{cases} \quad (9)$$

令等效匝数

$$N_{eq}(h) = (r - 2\cos \frac{2\pi h}{n})N \quad (10)$$

铁心磁导率为 μ 的等效电感值为

$$L_f(h)_{eq} = N_{eq}^2(h)\mu \quad (11)$$

可以看出, 滤波变压器上三个绕组的合成磁动势可以看作是一相电流通过等效匝数为 $N_{eq}(h)$ 的线圈形成, 以相间电磁耦合的变压器等效为滤波电抗器, 同样计算好滤波电抗器大小即可形成滤波变压器的具体要求。即需要 $L_f(h)_{eq} > 0$ 则能实现变压器的滤除谐波能力。

本文制作的耦合变压器滤波装置即借鉴空间分布式旋转磁场的电磁耦合。以多重化整流变压器模拟电动机中的旋转磁场: 多绕组合成正弦变化的旋转磁场, 结合变压器的电磁耦合特性, 在

多绕组二次侧中感应电动势,即是具有同步电动机运行特性的新型静止电磁耦合型谐波抑制整流装置。实验接线原理图如图2所示。

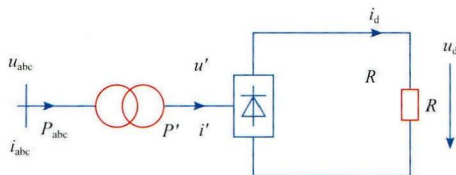


图2 实验原理接线图

装置中变压器采用12槽铁心结构,一次侧和二次侧各放置24个线圈绕组,通过不同接线方式,可以获得24相、12相、6相和三相等不同的电源形式,制作时采用了二次侧接成12相的环形方式。

利于原理性说明,把变压器连接成自感为 \$L\$、互感为 \$M\$ 的三相输出形式,有

$$\begin{pmatrix} u'_a \\ u'_b \\ u'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_a & -M_{ab} & -M_{ac} \\ -M_{ab} & L_b & -M_{bc} \\ -M_{ac} & -M_{bc} & L_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$u'_{ab} = u_{ab} + (L_a \frac{di_a}{dt} - M_{ab} \frac{di_b}{dt} - M_{ac} \frac{di_c}{dt}) - (L_b \frac{di_b}{dt} - M_{ab} \frac{di_a}{dt} - M_{ac} \frac{di_c}{dt}) \quad (13)$$

对 \$L_a = L_b = L_c = L\$, \$M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = M\$, 二次侧输出功率为 \$P'\$, 有

$$u'_{ab} = u_{ab} - (L + M) \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \quad (14)$$

$$\Delta P = P_{abc} - P' = (L + M) \left(\frac{di'_a}{dt} i'_a + \frac{di'_b}{dt} i'_b + \frac{di'_c}{dt} i'_c \right) \quad (15)$$

非线性负载引起电流畸变,电流畸变变化率 \$di'/dt\$ 与耦合电抗器中存储的磁场能量 \$\Delta P\$ 成正比,产生畸变的感应电势,达到波形的有效矫正,抑制谐波。改变线圈连接方式,形成多相电压输出后整流,整流效果较好。

实验测试及其数据分析

1. 输出直流电压质量及交流侧谐波含量分析

图3为三相/12相变压器整流后输出的电压波

形,其中负载为200 W功率的灯泡,示波器通道CH1为一次侧输入侧C相电压,通道CH2为整流输出侧直流电压。图4为直流侧基波和谐波含量数据。

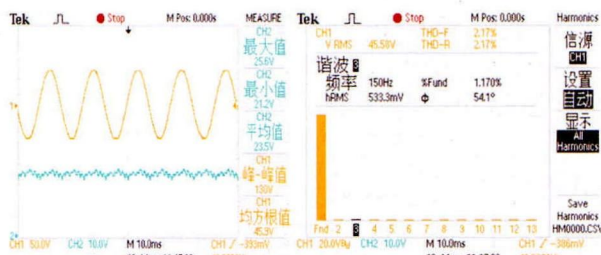


图3 输入C相电压和输出电压波形

图4 输入电压成分

由图3可以看出,整流后的电压波形很平稳,每周期脉动12次,输出电压最大值25.6 V,最小值21.2 V,平均值23.5 V,波形输出波动小,波形平整。

交流侧谐波含量低,畸变率为2.17%,3次谐波含量与基波含量的比值仅为1.170%,说明整流对一次侧的影响较小,产生电压谐波含量少。

传统的12相整流变压器与自耦变压器整流后输入电流的谐波畸变率一致^[12],均为15.22%。变压器整流后的输入电流波形如图5中通道CH3所示,其对应电流畸变率结果如图6所示。从图5可以看出,输入电流波形呈现正弦化,交流侧5次谐波电流仅为3.398%,谐波含量THD-F为4.36%,THD-R为3.93%,比传统12相整流变压器和自耦整流变压器好,交流侧电流畸变小,对系统的运行影响小。

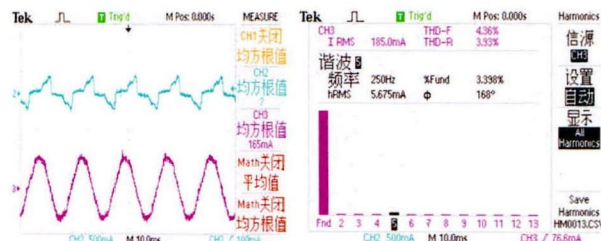


图5 输入电流(CH3)

图6 输入电流成分

2. 负载变化整流特性分析

为了测试整流装置负载变化时的性能,在负载端分别连接不同阻值大小和性质的负荷进行。

表1、表2即为连接不同性质负载后的输入电流谐波畸变率和整流输出电压参数。

表1 阻性负载输入电流谐波畸变率和输出电压

负载功率/W	输入电流THD-R (%)	输出电压/V		
		最大值	最小值	平均值
200	2.17	25.6	21.2	23.5
400	2.15	22.4	17.6	20.2
550	2.03	20.8	16.0	18.8

表2 阻容负载输入电流谐波畸变率和输出电压

负载200 W	输入电流THD-R (%)	输出电压/V		
		最大值	最小值	平均值
不串并联电容	3.20	25.0	21.4	23.5
并联350 μ F电容	3.18	23.6	23.2	23.4
并联700 μ F电容	2.90	23.6	23.2	23.4

可以看出,随着电阻性负载的增大,直流侧最大值和最小值间差距基本不变,说明脉动幅值保持稳定;电压大小有所降低;交流侧随着负载的增加谐波各含量降低,说明负载的增加不会使交流侧谐波升高,反而降低,具备良好的阻性负载能力。

并联电容使得直流侧电压输出最大值减小,最小值增大,即波形更加平稳;直流侧电压平均值输出改变不大,说明直流侧整流效果好,纹波系数小;交流侧谐波含量稳定,说明不用并联电容整流效果已很佳,实验时直流侧串电感对实验数据几乎没有影响,除了感抗值小还因为整流后脉动直流中谐波高次谐波含量少,脉动系数小,波形平整,整流效果很好。

结束语

整流器是电网中的主要谐波源。整流波形的脉波数越多,其次数低的谐波被消去的也越多。多脉波整流能有效降低输出端直流电压纹波幅值,提高整流输出质量,同时减少交流网侧的谐波注入,降低整流对电网的影响。

本文研究的多脉波整流装置具有良好的适应负载变化特性,直流侧无须串并联平衡均流器件,交流侧不用加装滤波装置即可实现直流输出平稳,交流侧波形正弦化好,对交流侧的影响极

小,对于维护系统的稳定运行具有积极意义,具有良好的应用价值。

参考文献

- [1] 王兆安,刘进军.电力电子变流技术[M].5版.北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 罗安.电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 孟凡刚,杨世彦,杨威.多脉波整流技术综述[J].电力自动化设备,2012(2):9-22.
- [4] 刘凯,李明勇.多相整流谐波抑制技术[J].船电技术,2005(3):26-29.
- [5] Gong G, Drofenik U, Kolar J W. 12-Pulse rectifier for more electric aircraft applications[J]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003(2):1 096-1 101.
- [6] 赵众,王平.基于自耦变压器的两种多脉波整流系统的分析和比较[J].高压电器,2006(2):116-119.
- [7] 马伟明.交直流电力集成技术[J].中国工程科学,2002(12):53-59.
- [8] 王东,马伟明,顾伟峰,等.12/3相双绕组感应发电机的谐波不对称分析[J].中国电机工程学报,2004(5):152-156.
- [9] 顾伟峰,马伟明,王东,等.12/3相双绕组异步发电机自激起励时谐波谐振问题研究[J].中国电机工程学报,2004(6):171-175.
- [10] Lyra R O C, Lipo T A. Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2002, 38(2):1 351-1 360.
- [11] Klingshirn E A. Harmonic filters for six-phase and other multi phase motors on voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21(4):588-593.
- [12] 任志新.多脉冲自耦变压整流器(ATRU)的研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.

(收稿日期:2014-08-10) EA