

# 双反星形整流电路并联运行环流分析

许留伟, 刘小宁

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 从三相半波整流电路输出直流电压数学表达式入手, 对两组带平衡电抗器双反星形整流电路并联运行的环流进行分析, 提出了在两组整流电路之间省略平衡电抗器的新观点, 并通过仿真证明了此观点的正确性。

**关键词:** 双反星形; 环流; 平衡电抗器

## Analysis of Interphase Reactor for Parallel Operating Rectifiers

XU Liu-wei, LIU Xiao-ning

**Abstract:** It is analyzed the circulating current produced by parallel operating of two sets of double reverse star rectifier with interphase reactor on the basis of mathematical equation of output voltage for three-phase semiwave rectifier circuit. A new view of omitting interphase reactor between two rectifier circuits is proposed, and the simulation results demonstrate the validity of this new view.

**Keywords:** Double reverse star; Circulating current; Interphase reactor

中图分类号: TN86

文献标识码: B

文章编号: 0219-2713(2003)06-0308-03

### 1 引言

在我国大型核聚变装置、强磁场装置及电解、电镀等方面的应用中, 经常需要电压为几 V 至十几 V、电流为几 kA 至几十 kA 的可调直流电源。在这种低电压大电流可调直流电源的设计中, 一般采用双反星形带平衡电抗器整流电路。由于受晶闸管最大额定电流的限制, 在很多情况下必须采用晶闸管并联才能满足要求。另一方面由于双反星形带平衡电抗器整流电路输出的直流电压为 6 脉波, 不能满足如核聚变装置、强磁场装置等这种对纹波要求较高的场合<sup>[1]</sup>。为了减小输出直流电压的谐波含量和减轻整流装置高次谐波电流对电网的影响, 也为了减少晶闸管并联过多对装置设计带来的麻烦, 可以采用两组双反星形带平衡电抗器整流装置(一组整流变压器原边接成星形, 另一组接成三角形)并联运行, 从而使相电压移相 30°达到 12 相的整流效果。按照常规设计, 需在两组整流装置输出端之间接一平衡电抗器来限制两组整流装置之间的环流。本文通过对两组整流装置并联运行时的环流进行分析, 得出了两组整流装置之间可以不加平衡电抗器即可完全满足工程需要的

新结论, 通过仿真证明了此结论的正确性。

### 2 等效电路的建立

图 1 是两组双反星形整流电路并联运行电路图, 每组带平衡电抗器的整流电路的输出整流电压波形是两个相差 60°的三相半波整流输出电压波形的叠加<sup>[2]</sup>(由于平衡电抗器的作用, 使两个星形能够并联运行), 而总的输出电压波形是两组整流电路输出电压波形的叠加。对于每个三相半波整流电路的输出电压波形, 可利用富氏级数展开式, 分解成各谐波正弦函数, 其触发角  $\alpha = 0$  时富氏级数的数学表达式为:

$$U_{d1} = 1.17 U_2 \left( 1 + \frac{1}{4} \cos 3\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t + \dots \right)$$

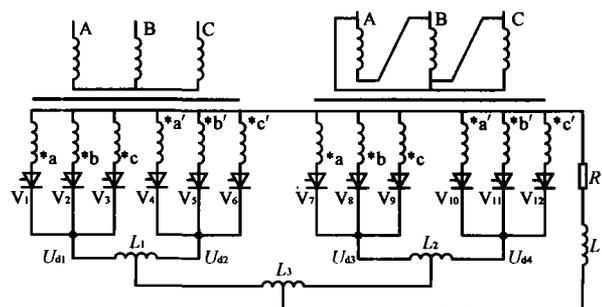


图 1 双反星形带平衡电抗器整流电路并联运行主电路图

收稿日期: 2002-09-27

$$\frac{1}{40} \cos 9 \omega t - \frac{2}{143} \cos 12 \omega t + \dots \quad (1)$$

$$U_{a2} = 1.17 U_2 \left( 1 - \frac{1}{4} \cos 3 \omega t - \frac{2}{35} \cos 6 \omega t - \right.$$

$$\left. \frac{1}{40} \cos 9 \omega t - \frac{2}{143} \cos 12 \omega t + \dots \right) \quad (2)$$

$$U_{a3} = 1.17 U_2 \left( 1 + \frac{1}{4} \cos (3 \omega t - \pi/2) + \frac{2}{35} \cos 6 \omega t + \right.$$

$$\left. \frac{1}{40} \cos (9 \omega t + \pi/2) - \frac{2}{143} \cos 12 \omega t + \dots \right) \quad (3)$$

$$U_{a4} = 1.17 U_2 \left( 1 - \frac{1}{4} \cos (3 \omega t - \pi/2) + \frac{2}{35} \cos 6 \omega t - \right.$$

$$\left. \frac{1}{40} \cos (9 \omega t + \pi/2) - \frac{2}{143} \cos 12 \omega t + \dots \right) \quad (4)$$

由以上表达式可知,各三相输出电压是由不同频率的正弦波组成,按照电路叠加原理<sup>[3]</sup>,各支路的环流计算,我们可以认为是各个成分(包括直流分量和各谐波分量)共同作用相互叠加的结果。由于在每个支路中直流分量和十二次谐波电压的相位相同而相互抵消,因此,它们不产生环流。计算环流等效电路如图2所示。

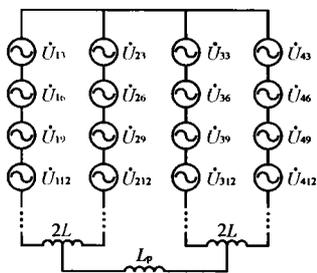


图2 计算环流等效电路

### 3 各次谐波电压产生的环流计算

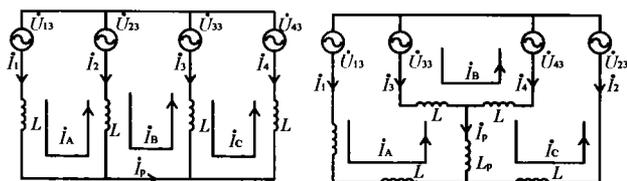
首先计算三次谐波电压单独作用产生的环流,图3是三次谐波电压作用计算环流等效电路图。为了对两种情况下的计算结果进行比较,等效电路图分为图3(a)和图3(b),其中图3(a)是无平衡电抗器 $L_p$ 等效电路图,图3(b)是有平衡电抗器 $L_p$ 等效电路图。

式(1)中各电压表达式中的三次谐波电压可用向量表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{13} &= U_3 \\ \dot{U}_{23} &= -U_3 \\ \dot{U}_{33} &= -U_3 j \\ \dot{U}_{43} &= U_3 j \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $U_3 = \frac{1.17 U_2}{4 \sqrt{2}}$ 。

对于图3(a),用回路法列回路方程组



(a) 无平衡电抗器 (b) 有平衡电抗器

图3 三次谐波作用计算环流等效电路图

$$\begin{bmatrix} 2j3\omega L & -j3\omega L & 0 \\ -j3\omega L & 2j3\omega L & -j3\omega L \\ 0 & -j3\omega L & 2j3\omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2U_3 \\ -U_3 + U_3 j \\ -2U_3 j \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于图3(b),同样用回路法列回路方程组

$$\begin{bmatrix} 2j3\omega L + j3\omega L_p & -j3\omega L & -j3\omega L_p \\ -j3\omega L & 2j3\omega L & -j3\omega L \\ j3\omega L_p & -j3\omega L & 2j3\omega L + j3\omega L_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_3 + U_3 j \\ -2U_3 j \\ U_3 + U_3 j \end{bmatrix} \quad (7)$$

按照同样方法可以列出六次、九次谐波电压单独作用时的回路方程组。解此方程组可得出各支路的谐波电流及环流,计算结果如表1所列。

表1 各次谐波电压环流计算结果

支路电流	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_p$	
3次谐波	有 $L_p$	$I_{3j}$	$-I_{31}$	$I_{31}$	0	0
	无 $L_p$	$I_{3j}$	$-I_{31}$	$I_{31}$	0	0
6次谐波	有 $L_p$	$I_{6j}$	$-I_{61j}$	$-I_{61j}$	$2I_{61j}$	$2I_{61j}$
	无 $L_p$	$I_{62j}$	$-I_{62j}$	$-I_{62j}$	$2I_{62j}$	$2I_{62j}$
9次谐波	有 $L_p$	$I_{9j}$	$-I_{91}$	$I_{91}$	0	0
	无 $L_p$	$I_{91j}$	$-I_{91}$	$I_{91}$	0	0

$$I_{n1} = \frac{3 \sqrt{3} U_2}{\pi n(n^2 - 1) \omega L}, \quad I_{n2} = \frac{3 \sqrt{3} U_2}{\pi n(n^2 - 1) \omega (L + L_p)},$$

$n = 3, 6, 9 \dots$

由以上的计算结果可知,无论是图3(a)或者图3(b),三次和九次谐波电压产生的环流不流过 $L_p$ ,只在本组整流电路的两支路内流动,与两组整流电路之间的环流无关。六次谐波电压产生的环流全部流过 $L_p$ ,而不在本组整流电路之间流动,是两组整流电路之间环流的组成部分。

### 4 平衡电抗器电感量和环流计算

把以上所计算的各次谐波电压产生的环流相叠加,便可得出每个支路环流 $i_{1H}$ 和每组整流电路之间

的实际环流  $i_p$ 。

$$i_{IH} = \sqrt{2} \frac{U_3}{3\omega L} \cos(3\omega t - \pi/2) + \sqrt{2} \frac{U_6}{6\omega L} \cos(6\omega t + \pi/2) + \sqrt{2} \frac{U_9}{9\omega L} \cos(9\omega t - \pi/2) + \dots \quad (8)$$

$$i_p = \sqrt{2} \frac{2U_6}{6\omega L} \cos(6\omega t + \pi/2) + \dots \quad (9)$$

一般情况下,每组整流器的环流都限制在额定电流值的1%~2%,也就是两组整流器输出总电流的0.5%~1%。由于晶闸管的单向导电性,环流的最大值不能大于工作电流值,否则晶闸管将会阻断,使电路处于六相半波运行状态,而不能进入并联运行状态。图4是当每组整流器的环流限制在1%时,电感  $L$  和两组整流器之间的环流  $i_p$  随  $L_p/L$  变化曲线。

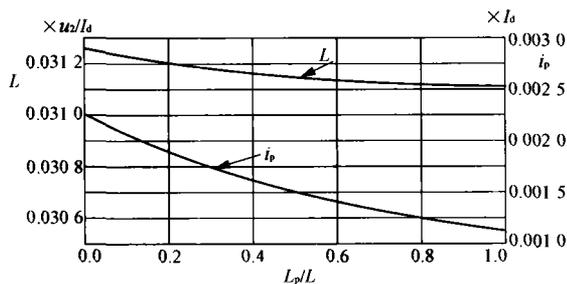


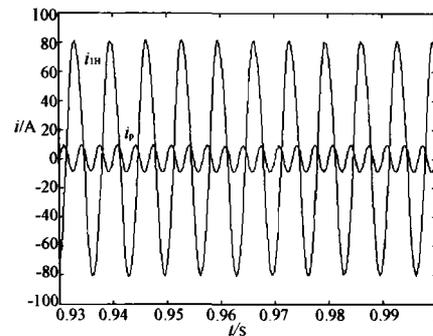
图4 环流限制在1%时  $L$  和  $i_p$  随  $L_p/L$  变化曲线

由图4曲线  $L$  可以看出,  $L_p/L$  从0(无  $L_p$ )到1之间变化时,当环流限制在1%时,所需的电感量仅减小了  $0.00016 U_2/I_d$  (从  $0.03127 U_2/I_d$  变化至  $0.03111 U_2/I_d$ ),也就是说  $L_p$  的变化并不影响环流  $i_{IH}$ 。从图4曲线  $i_p$  可以看出,当  $L_p/L$  从0到1之间变化时,  $i_p$  从  $0.00227 I_d$  变化至  $0.00113 I_d$ 。如果此时额定电流为10kA,则其环流从22.7A变为11.3A,由此可见,电感  $L$  已经起到限制环流的作用,在满足每组整流器环流限制值1%的情况下,两组整流器之间的环流为22.7A。这完全能够满足工程要求,同时也减小了工程造价。

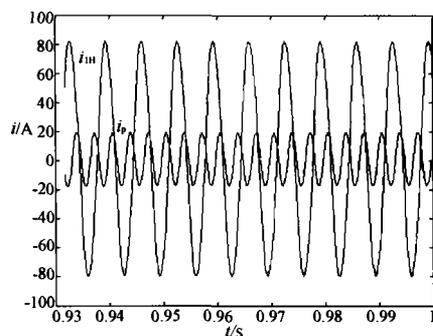
## 5 仿真结果

为了验证本文的研究结果,我们用MATLAB对此电路进行了仿真,图5为仿真结果曲线。仿真电路参数是按照HT-7U超导托克马克纵场电源的具体参数来选取。其值为:  $U_2 = 18V$ ,  $2L = 0.3mH$ ,  $L_p = 0.15mH$ , 负载为电感量3.25H、电阻为6.6mΩ的大电感负载。

由图5可知,无论有无中间平衡电抗器,每组整流器之间的环流大约为80A,而两组整流器之间的环流在两种情况下分别为19.6A和9.3A,证明了理论分析的正确性。



(a) 有平衡电抗器  $L_p$



(b) 无平衡电抗器  $L_p$

图5 双反星形带平衡电抗器整流电路并联运行环流波形图

## 6 结语

- 1) 对于两组并联运行的双反星形带平衡电抗器整流电路,可以省去两组整流器之间的平衡电抗器。
- 2) 两组双反星形带平衡电抗器整流电路并联运行时产生的环流中,3的奇数倍次谐波电压产生的环流只在每组整流器之间的两相内流动。
- 3) 在3的偶数倍次谐波中,6的奇数倍次谐波电压产生的环流只在两组整流器之间的两相内流动。
- 4) 在3的偶数倍次谐波中,6的偶数倍次谐波电压不产生环流,与直流量一起组成并联后输出电压的组成部分。因此,在这种联结方式下,其输出电压的最低次谐波是12次谐波,这与用其它方法分析的结果相一致。

### 参考文献

- [1] A. Nitsche, J. Sapper. Power Supply and Quench Protection for the WENDELSTEIN 7-x Magnet[J]. Fusion Technology, 1994: 755 - 758.
- [2] 黄俊. 半导体变流技术[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 邱关源. 电路[M]. 北京:机械工业出版社.
- [4] 许留伟. HT-7U纵场电源设计与分析[D]. 中国科学院等离子体物理研究所硕士论文,1999.