

具有三相恒流充电机的高稳定 度连续激光器电源

郑世明

(四川大学物理系激光研究室)

提要: 本文给出一种新的连续激光器电源电路。该电路采用三相电感-电容变换器作为恒流源。输出电流范围从5 A至40 A内连续可调, 电流稳定度可达 10^{-3} 量级。该装置线路简单, 调整、操作及维修均很方便, 工作可靠。

Stable power supply with three-phase Flotrol for CW lasers

Zheng Shiming

(Department of Physics, Sichuan University)

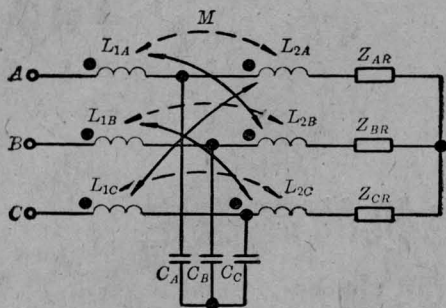
Abstract: A new circuit for CW laser power supply with three-phase Flotrol is presented. The output current can be adjusted continuously from 5 to 40 ampere, and the current stability is up to 10^{-3} . It has the advantages of simple structure, stable operation and easy adjustment and maintenance.

针对各类电源存在的问题, 近几年来气体及固体激光器的泵浦电源, 将电压源变为电流源的电感-电容变换器(以下简称 $L-C$ 变换器)逐渐获得了广泛应用。目前已报道了使用单相 $L-C$ 变换器的固体脉冲激光电源^[1~3]。为满足较大功率连续 YAG 激光器的高稳定度的需要, 我们研制了一台具有三相 $L-C$ 变换器的高稳定度电源, 电流范围从5 A到40 A连续可调, 电流稳定度可达 10^{-3} 量级(该指标系指在三相交流输入端接有稳压器时的数据)。

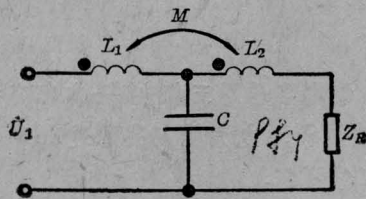
一、三相 $L-C$ 变换器的 原理及优越性

三相变换器中较常见的是三电抗器式 $L-C$ 变换器, 这类变换器包含有三个各自独立的电抗器, 按其耦合方式又可分为相内耦合 T 形变换器及相间耦合 T 形变换器(图1(a))。不难看出图1(a)中虚线耦合方式即等价于三个单相 T 形变换器, 故这种相内耦

收稿日期: 1984年3月6日。



(a) 虚线: 相内耦合, 实线: 相间耦合, Z_{AR} , Z_{BR} , Z_{CR} 分别为 A, B, C 三相之负载



(b) 单相 T 形 L-C 变换器

图 1

合三相变换器的基本特性与单相 T 形变换器 (图 1(b)) 完全相同。其分析方法及优点详见文献[1]。图 1(a) 中实线耦合方式即为相间耦合三相 T 形变换器, 这是最通用最典型的三相 L-C 变换器。这类变换器的特点是每一只电抗器的两个绕组分别接在不同的电源和负载上。如图 1(a) 中共用一个磁路的两个绕组 L_{1A} 和 L_{2B} 分别接在 A 相电源和 B 相负载上。

对多相 L-C 变换器, 一般可用 $2(p+1)$ 端即多端网络理论进行分析 (p -相数), 求出其满足 $A_{11}=0$ 的条件 (即恒流条件, A_{11} 的意义见文献[1]), 但这一求解过程较为复杂。为简单起见, 在忽略电抗器及电容器中的损耗并假设电源负载电路元件均为对称时, 可采用图 2 所示的单相等效电路进行分析。但此时应计入另外两相 (对 $p=3$ 时) 感应到 A 相中的互感电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 :

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_{BR} j \omega M, \quad \dot{E}_2 = \dot{I}_{CR} j \omega M。$$

利用负载电流与其阻抗无关的谐振条件

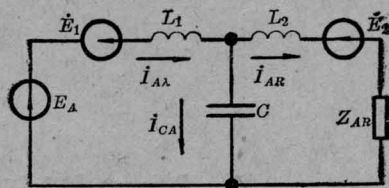


图 2 三相 T 形变换器的单相等效电路

\dot{I}_λ 为输入端的相电流

($\omega^2 LC=1$) 及图 2 的等效电路可得以下公式^[3]:

$$\dot{I}_\lambda = \frac{E}{X} \cdot \frac{jk_{21}^2 - j + n}{k_C^2 k_{21}^2 - k_C k_{21} + 1} \quad (1)$$

$$\dot{I}_R = \frac{E}{X} \cdot \frac{j(ak_C k_{21} + 1)}{k_C^2 k_{21}^2 - k_C k_{21} + 1} \quad (2)$$

$$\dot{I}_C = \frac{E}{X} \cdot \frac{jk_{21}(k_{21} + ak_C) + n}{k_C^2 k_{21}^2 - k_C k_{21} + 1} \quad (3)$$

式中 $k_{21} = \frac{W_2}{W_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$ 是电抗器绕组间的变换系数; $k_C = M / \sqrt{L_1 L_2}$ 是绕组间的耦合系数; $n = Z_R / \omega L_1 = Z_R / x$ 是变换器输出端的相对负载; a 是电抗器绕组的感抗; $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$ 是相位因子。

(1)~(3) 式对每相电源均成立, 只不过每相电流间分别具有 $\pm \frac{2\pi}{3}$ 的位相差而已。再利用电路的对称性假设可得以下公式:

$$\dot{E}_A = E, \quad \dot{E}_B = E a^2, \quad \dot{E}_C = E a,$$

$$\dot{I}_{BR} = \dot{I}_{AR} a^2, \quad \dot{I}_{CR} = \dot{I}_{AR} a。$$

有了上述方程, 就可具体计算一个三相 T 形变换器。由 (2) 式可知, \dot{I}_R 的表达式中不含有 n , 即负载电流与负载阻抗无关, 而仅取决于电源电压 E 及电感参数。

单相 L-C 变换器有许多优越的特性^[1]。特别适合于小功率脉冲电源。但作为大功率连续器件的电源, 三相变换器却较单相更为有利。这是因为它在任何不对称的电源电压下工作时亦可使每一相的负载电流保持恒定, 故特别适合于功率大于几百瓦的电源; 其次单相桥式整流后其波纹因数达 40% 左右, 而三相桥式整流后波纹因数仅为 4% 左右且

其脉动成分的频率也较高(300 Hz)。因而所需的滤波电路可大大简化。在适当的滤波网络下即可获得极小脉动的电流。最后,作为恒流源的三相变换器中电抗元件的标称功率与单相的不同,它取决于负载的变化范围。而一般连续 YAG 器件的负载变化范围是有限的(约 1:6)。这不同于脉冲器件中负载的“无限”变化—即存在负载短路的状态。由此可根据负载变化的范围尽量降低电抗元件的标称功率,以使电源外形尺寸及重量大大减小。

二、三相变换器电抗元件标称功率的估算

为了在满足恒流特性的要求下尽量减小电感器及电容器的体积和重量,必须对作为变换器特性的主要衡量指标,即电抗元件的标称功率及变换器的效率进行计算,以选其最佳设计值。下面给出相间耦合三相 T 形变换器的主要公式^[3]。

1. 电容器的标称功率:

$$q_C = Q_C / P_R \quad (4)$$

式中 q_C 是电容器的相对标称功率, $Q_C = |\dot{I}_C|^2 \frac{1}{\omega C}$ 是电容器的额定无功功率。 $P_R = |\dot{I}_R|^2 R_{\text{负载}}$ 为每一相负载的有功功率。通常假设 $k_0 = 1$, 将(1)~(3)式代入(4)式可得:

$$q_C = Q_C / P_R = \frac{n^2 - nk_{21} \sqrt{3 + k_{21}^2 (k_{21}^2 - k_{21} + 1)}}{n(k_{21}^2 - k_{21} + 1)} \quad (5)$$

由(5)式可求出当 $n_C = n'_C$ (n'_C 是最佳相对负载)时,变换器不仅取得最大效率^[4],而且电容器的相对标称功率 q_C 取得最小值 $(q_C)_{\min}$ 。这就意味着当负载在有限范围内变化时(相对于连续器件的情况),电容器组的标称功率就可以大大降低。图 3 给出当 $k_{21} = 0.5$ 时电容器的相对标称功率 $\bar{\theta}_C (= (\theta_C)_{\max} / P_{\text{负载}}(n_{\max}))$ 与负载变化范围 $r (= n_{\max} / n_{\min})$ 的关系曲线,因此在已知 r 时即可由此曲线查出最小的 θ_C 值。

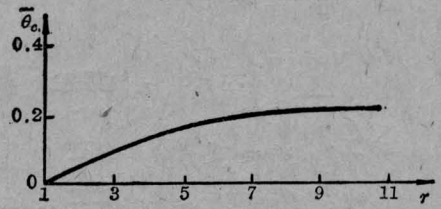


图 3 $\bar{\theta}_C-r$ 曲线

2. 电感器的标称功率:

$$\theta_{LT} = 0.5 \frac{E^2}{x} F(n, k_{21}) \quad (6)$$

式中 θ_{LT} 为电感器的标称功率,

$$F(n, k_{21}) = \frac{\sqrt{A + k_{21}} \sqrt{B}}{k_{21}^2 - k_{21} + 1},$$

$$A = (n^2 + k_{21}^4 - 2k_{21}^2 + 1)$$

$$\times (n^2 - nk_{21} \sqrt{3} + k_{21}^2 - k_{21} + 1),$$

$$B = (k_{21}^2 - k_{21} + 1)$$

$$\times (n^2 - nk_{21} \sqrt{3} + k_{21}^2 - k_{21} + 1)。$$

电感器的外形尺寸取决于 θ_{LT} 。设计时可先由(6)式作以 k_{21} 为参量的 $\theta_{LT} \sim n$ 曲线。利用这组曲线及类似 1 中求 $\bar{\theta}_C$ 的方法就可以确定电感器的相对标称功率 $\bar{\theta}_{LT} (= \theta_{LT} / P_{\text{负载}}(n_{\max}))$ 与 r 的关系。设计时应根据负载的变化范围(即不同的 r 值)来选 k_{21} 的值。

三、整机电路及实验结果

整机电路如图 4 所示,元件参数详见附录。

① 未采取稳压稳流措施时:

单相电源电压变化率:

$$\frac{\Delta u_\lambda}{u_\lambda} = \frac{25 \text{ V}}{220 \text{ V}} = 11\%。$$

负载电流稳定度:

$$S = \frac{\Delta I_{\text{出}}}{I_{\text{出}}} = \frac{5 \text{ A}}{25 \text{ A}} = 20\%$$

② 只接入稳压器时:

输出直流电压变化率:

$$\frac{\Delta u_{\text{出}}}{u_{\text{出}}} = \frac{0.5 \text{ V}}{130 \text{ V}} = 0.4\%$$

$$S = \frac{\Delta I_{\text{出}}}{I_{\text{出}}} = \frac{25 \text{ A}}{0.5 \text{ A}} = 2\%。$$

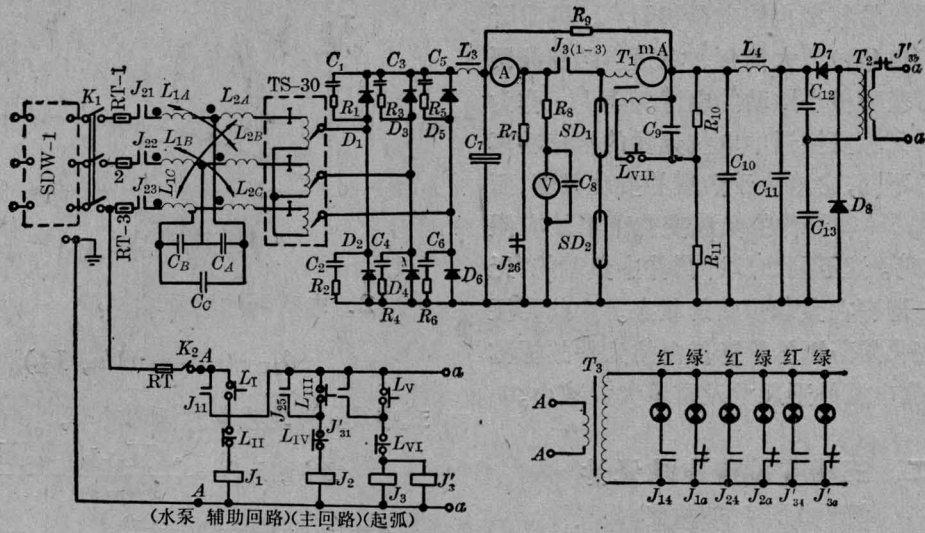


图4 整机电原理图

故采用电压稳定装置后，负载电流变化率可降低一个数量级(由20%降为2%)

③ 稳压器加三相L-C变换器:

负载电流为25A，用数字电压表来测定，结果为:

$$S = \frac{0.028 \text{ A}}{25 \text{ A}} \approx 0.11\%$$

故接入L-C变换器后稳流精度比仅加稳压器时提高了一个数量级。

参 考 文 献

- [1] 孙乃庚等;《激光》,1978, 5, No. 2, 24.
- [2] 孙乃庚等;《中国激光》,1983, 10, No. 4, 246.
- [3] N. B. 波尔科夫, B. M. 巴甫连柯著, 孙乃庚等译, “激光器的电源”。

附 录

图4 线路各元件参数表

元件编号	名 称 及 参 数	元件编号	名 称 及 参 数
SDW-1	三相电源自动稳压器(50 kVA)	R ₈	470 K/2 W
RT-1,		R ₉	510 K/15 W
RT-2,		R ₁₀ ~R ₁₁	510 K/5 W
RT-3	熔断器, RLS50 A	C ₁ ~C ₆	0.22 μF/630 V
L ₁ ~L ₂	三相 L-C 变换器电抗器, 每个绕组 L=51 mH。共 6 个绕组	C ₇	500 μF/900 V
C _A , C _B , C _C	三相 L-C 变换器电容器。每个容量 C=200 μf/800 V	C ₈	0.4 μF/1 kV
TS-30	三相交流调压器, TSGC30/0.5	C ₉ ~C ₁₁	1 μF/2 kV
D ₁ ~D ₆	2CZ50 A/1000 V	C ₁₂ ~C ₁₃	4 μF/4 kV
D ₇ ~D ₈	2DL0.5/10 kV	T ₁	触发变压器(汽车点火线圈代用)
L ₃	50 mH	T ₂	升压变压器 220 V/1.2 kV
L ₄	20 W 日光灯镇流器	T ₃	指示灯变压器 220 V/6.3 V
安培表	44C2-A, 50 A	J ₁ ~J ₃	交流接触器, CJO-40 A
毫安表	44C2-A, 300 mA	J' ₃	交流接触器, CJO-10 A
伏特表	44C2-V, 250 V	L _I ~L _{VII}	按钮, L _A 1911 J
R ₁ ~R ₆	20 K/3 W	SD ₁ , SD ₂	氩灯, 5 kW, φ10×100
R ₇	470 Ω/50 W	RT'	熔断器, 4 A
		K ₁	三相电源闸刀开关
		K ₂	辅助电路电源开关