

性能优良的高频软开关三相逆变电源

李 旭, 陈道炼, 张 蓉, 张海涛

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:对基于占空比扩展有源箝位正激式高频脉冲直流环节逆变器的组合式三相逆变电源的电路拓扑、稳态原理、三态 DPM 电流滞环控制技术、负载特性、关键电路参数设计进行了深入的分析研究。设计并研制成功了 3kVA 27V DC/200V400Hz AC 高频软开关三相逆变电源,它具有体积小、变换效率高、静态精度高、动态响应快、输入电压变化范围宽、输出波形质量高、过载与短路能力强、带三相不平衡负载的能力强、逆变桥功率开关实现 ZVS 等优良的综合性能。

关键词: 三相; 逆变电源 / 高频软开关; 高频脉冲直流环节; 三态离散脉冲调制

中图分类号: TM464; TN86

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2005)01-0083-03

High Frequency Soft-switching Three-phase Inverter with Excellent Performance

LI Xu, CHEN Dao-lian, ZHANG Rong, ZHANG Hai-tao

(Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper investigates the circuit topology, steady principle, control strategy of three-state Discrete Pulse Modulation (DPM) hysteresis current, load characteristic, criterions of the key circuit parameters of the combined three-phase inverter based on the inverter with duty cycle extended active clamp forward high frequency pulse dc link. A designed and developed prototype for DC 3kVA 27V / AC 200V400Hz three-phase inverter with high frequency soft-switching has excellent comprehensive performances such as small bulk, lower weight, high conversion efficiency, high steady precision, fast dynamic response, wide input voltage range, good output waveforms, strong over-load and short-circuit ability, strong ability with different nature load and three-phase unbalanced load, and ZVS of the inverter bridge.

Key words: three-phase; inverter / high frequency soft-switching; high frequency pulse dc link; three-state Discrete Pulse Modulation (DPM)

1 引言

三相逆变器广泛应用于用电量或三相四线制供电负载场合,其电路拓扑主要有三相全桥式、三相半桥式、三相四桥臂式^[1]和组合式等结构^[2]。

三相全桥逆变器具有电路拓扑简洁、所用功率器件数少、功率开关电压应力低等优点,但为了提高带不平衡负载的能力,必须在其输出端增加中点形成变压器,从而显著增加了逆变器的体积和重量。三相半桥逆变器虽然也有上述优点,但其输入直流电源电压利用率较低,而且相同输出电压时功率开关的电压应力较大。为了获得强的带不平衡负载的能力,两个串联的电解电容必须足够大,从而使逆变器体积和重量增加。三相四桥臂逆变器虽然带不平衡负载的能力较强,但其电路拓扑较复杂、所用功率器件数较多、控制也复杂。

组合式三相逆变器由 3 个单相逆变器星形联结构成,能同时实现单相和三相四线制供电。虽然这

种电路结构的元器件数多、成本高,但由于每相可分别独立控制,易实现模块化结构、在线热更换、N+1 模块冗余技术,因此系统的可靠性高,具有极强的带不平衡负载能力。文中分析研究了组合式高频软开关三相逆变电源,并给出了试验结果。

2 电路结构及其原理

2.1 电路结构

以占空比扩展有源箝位正激式高频脉冲直流环节逆变器为例,图 1 示出组合式高频软开关三相逆变电源构成原理。它由完全相同的 3 个高频软开关单相逆变电源模块星形联接构成,能同时实现单相和三相四线制供电。

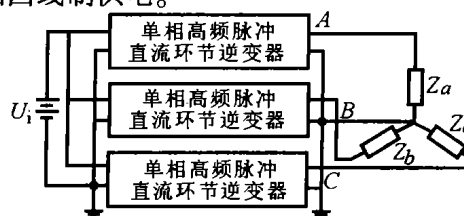


图 1 组合式高频软开关三相逆变电源电路结构

2.2 稳态原理

图 1 所示电路结构中 3 个单相模块的工作原理

定稿日期:2004-07-20

作者简介:李 旭(1979-),男,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为功率电子变换技术。

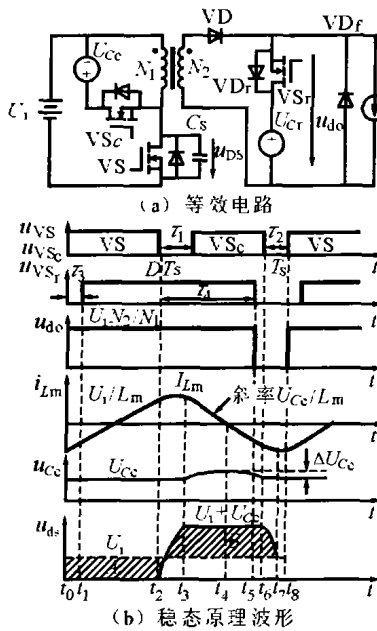


图 2 每个开关周期等效电路及其稳态原理波形
图中 i_{Lm} ——变压器磁化电流
 VD_r ——逆变桥等效续流回路
 A, B ——面积, $A=B$

完全相同,因此只需分析其中一相。
设箝位电容 C_c 和吸收电容 C_r 足够大,分别用电压源 U_{Cc}, U_{Cr} 表示;可以将整个逆变桥负载看成是高频脉冲直流环节电路低频交变的负载,可近似认为低频交变的负载在每个高频 PWM 开关周期内恒定不变,用电流源 i_U 表示。图 2 示出每个 PWM 开关周期内,占空比扩展有源箝位正激式高频脉冲直流环节电路等效电路及其原理波形。每个 PWM

PWM 控制。DC/AC 逆变桥采用输出电压和滤波电感电流双闭环反馈三态离散脉冲(DPM)控制技术,如图 3 所示。功率开关 VS_1, VS_2, VS_3, VS_4 在 u_{db} 零电平期间开关转换,调制电压 u_{AB} 的控制规律为:

$$u_{AB} = \begin{cases} +U_{d,om} + 1 & \text{状态 } (i_g - i_f > \delta, VS_1, VS_4 \text{ 导通}) \\ -U_{d,om} - 1 & \text{状态 } (i_g - i_f < -\delta, VS_2, VS_3 \text{ 导通}) \\ 0 & 0 \quad (|i_g - i_f| < \delta, VS_1, VS_2 \text{ 或 } VS_3, VS_4 \text{ 导通}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 δ ——半个滞环宽度

$U_{d,om}$ ——高频脉冲直流电压幅值

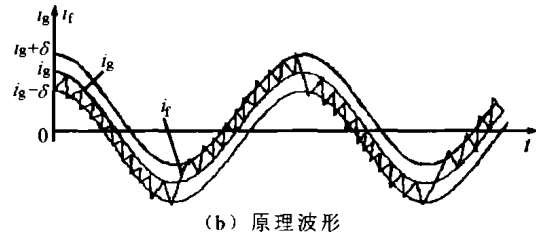
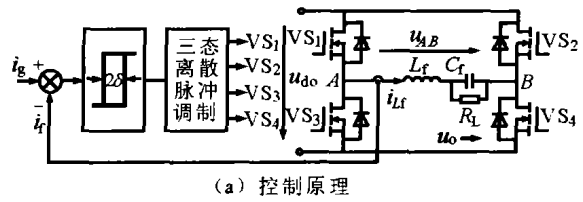


图 3 三态离散脉冲电流滞环跟踪控制原理

3 负载特性

3.1 不对称负载时三相输出电压的幅值偏差

不对称负载时,三相输出电压 u_A, u_B, u_C 的幅值偏差可以等效为单相输出电压 u_o 的负载调整率。电流滞环跟踪控制单相高频脉冲直流环节逆变器的不同负载时,系统的闭环传递函数分别为^[2]:

空载时: $G_o(s) = \frac{k_{pu}ks + k_i k}{C_f s^2 + k_{pu} k k_{uf} s + k_i k k_{uf}} \quad (2)$

阻性负载时:

$$G_R(s) = \frac{k_{pu}ks + k_i k}{C_f s^2 + (k_{pu} k k_{uf} + 1/R_L)s + k_i k k_{uf}} \quad (3)$$

感性负载时:

$$G_{RL}(s) = \frac{k_{pu}ks + k_i k}{C_f s^2 + (k_{pu} k k_{uf} + 1/R_L)s + k_i k k_{uf} + 1/L_L} \quad (4)$$

容性负载时:

$$G_{RC}(s) = \frac{k_{pu}ks + k_i k}{(C_f + C_L)s^2 + (k_{pu} k k_{uf} + 1/R_L)s + k_i k k_{uf}} \quad (5)$$

式(2)~式(5)的幅频特性为:

空载时: $|G_o(\omega)| = \sqrt{\frac{(k_{pu}k\omega)^2 + (k_i k)^2}{(k_i k k_{uf} - C_f \omega^2)^2 + (k_{pu} k k_{uf} \omega^2)^2}} \quad (6)$

阻性负载时:

$$|G_R(\omega)| = \sqrt{\frac{(k_{pu}k\omega)^2 + (k_i k)^2}{(k_i k k_{uf} - C_f \omega^2)^2 + [(k_{pu} k k_{uf} + 1/R_L)\omega]^2}} \quad (7)$$

感性负载时:

$$|G_{RL}(\omega)| = \sqrt{\frac{(k_p k \omega)^2 + (k_i k)^2}{(k_i k k_{uf} + 1/L_L - C_f \omega^2)^2 + [(k_p k k_{uf} + 1/R_L) \omega]^2}} \quad (8)$$

容性负载时:

$$|G_{RC}(\omega)| = \sqrt{\frac{(k_p k \omega)^2 + (k_i k)^2}{(k_i k k_{uf} - C_f \omega^2 - C_f \omega^2)^2 + 1 + [(k_p k k_{uf} + 1/R_L) \omega]^2}} \quad (9)$$

由式(6)~式(9)可知, $|G_o(\omega)| > |G_R(\omega)| > |G_{RL}(\omega)|$ 。至于 $|G_{RC}(\omega)|$ 的大小, 与容性负载参数 (C_f, R_L) 即容性负载功率因数有关。通常情况下, 即容性负载功率因数为 -0.75 时, $|G_{RC}(\omega)| > |G_o(\omega)| > |G_R(\omega)| > |G_{RL}(\omega)|$ 。因此, 逆变器从容性负载、空载、阻性、感性负载变化时, u_o 将单调下降, 其负载调整率由容性负载到感性负载时的压降 ΔU_o 决定。

3.2 相负载(星形负载)特性

设 u_A, u_B, u_C 对称, 有效值为 $115V$, 初相位分别为 $0^\circ, -120^\circ, -240^\circ$, 三相额定容量为 $3kVA$, 输出电压频率为 $400Hz$, $L_f=0.7mH, C_f=11\mu F$ 。当不对称相负载, 即 A 相空载 $R_{LA}=\infty$, B 相阻性半载 $R_{LB}=26.45\Omega$, C 相阻性满载 $R_{LC}=13.23\Omega$ 时, 各相滤波电感电流分别为 $i_{LA} = i_{CA} + I_A = 2.89 \angle 90^\circ (A)$, $i_{LB} = i_{CB} + i_B = 5.22 \angle -86.4^\circ (A)$, $i_{LC} = i_{CC} + i_C = 9.16 \angle 138.4^\circ (A)$, 故三相滤波电感电流幅值均不相等、相位差不再满足 $\pm 120^\circ$ 关系。

4 关键电路参数设计

箝位电容为^[3]:

$$C_c \geq \frac{(1-D)^2 T_s^2}{8L_m \Delta U_{c\alpha} / U_{c\alpha}} \quad (10)$$

式中 $\Delta U_{c\alpha} / U_{c\alpha} \leq 10\%$

按最坏情况, $D=D_{min}$ 来设计。为确保 u_o 波形质量, 应满足:

$$U_{do,avg} = \frac{N_2}{N_1} U_i (D + \Delta D) \geq 180V \quad (11)$$

式中 ΔD ——扩展占空比

由式(11)可知, $U_{do,avg}$ 值相同时, 总占空比 $(D + \Delta D)$ 越大, 高频脉冲直流电压幅值将越小。功率开关 VS 开通瞬间的冲击电流峰值为:

$$I_{Cr,peak} = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_i - U'_{c,min}}{|Z_s|} = \frac{\Delta U'_{Cr,max}}{|Z_s|} \quad (12)$$

式中 $\Delta U'_{Cr,max} = \frac{I_{Lshort} \Delta DT_s}{C_f}$

Z_s ——电路等效阻抗

$\Delta U'_{Cr,max}$ ——高频脉冲直流电压波占空比扩展期间 C_f 对逆变器供电引起的最大电压降落

I_{Lshort} ——负载短路时滤波电感电流

由式(12)可得:

$$I_{Cr,peak} = \frac{\Delta U'_{Cr,max}}{|Z_s|} = \frac{I_{Lshort} \Delta DT_s}{C_f |Z_s|} \quad (13)$$

三相输出电压的对称度常用电压幅值偏差 ΔU_o 和电压相位偏差 $\Delta \theta_o$ 表示, 即:

$$\Delta U_o = \frac{\text{最高相电压幅值} - \text{三相电压幅值平均值}}{\text{三相电压幅值平均值}} \times 100\% \quad (14)$$

$$\Delta \theta_o = \text{最大的相电压相位差} - \text{三相电压相位差的平均值} \quad (15)$$

式(15)中, 可由实测的相电压、线电压计算得到相电压相位差, 即:

$$\begin{cases} \theta_{AB} = \cos^{-1} \left(\frac{U_A^2 + U_B^2 - U_{AB}^2}{2U_A U_B} \right) \\ \theta_{BC} = \cos^{-1} \left(\frac{U_B^2 + U_C^2 - U_{BC}^2}{2U_B U_C} \right) \\ \theta_{CA} = \cos^{-1} \left(\frac{U_C^2 + U_A^2 - U_{CA}^2}{2U_C U_A} \right) \end{cases} \quad (16)$$

5 试验结果

设计实例: $f_s=80kHz; D=0.34 \sim 0.6; \Delta D=0.3; C_c=3.3\mu F$, 变压器磁芯选用 Mn-Zn LP3 型铁氧体材料 PM74, 变压器初级和次级匝比 $N_1:N_2=2:24; L_m=48\mu H; C_f=150\mu F; L_f=0.7mH; C_r=11.2\mu F$ 。

设计并研制成功的高频软开关三相逆变电源具有优良的综合性能: 直流输入电压 $U_i=18 \sim 32V$, 输出额定容量 $3kVA$, 容性时负载功率因数 $\lambda=-0.75$, 感性时 $\lambda=0.75$, 输出线电压 $200V \pm 4V$, 输出电压频率 $400 \pm 0.2Hz$, 输出电压波形畸变率 $THD < 1.0\%$, 额定容性、阻性和感性负载时变换效率分别为 $82\%, 84\%$ 和 87% 。110% 额定负载为 $120min$; 150% 额定负载时为 $5min$; 短路时间为 $5s$, 短路电流能力达 $22A$, 重量小于 $3 \times 4.4kg$, 体积 $3 \times 30.0 \times 15.2 \times 13.0cm^3$; 三相输出电压幅值不对称度小于 2% , 三相输出电压相位差角为 $120^\circ \pm 2^\circ$ 。逆变桥功率开关试验波形见图 4。

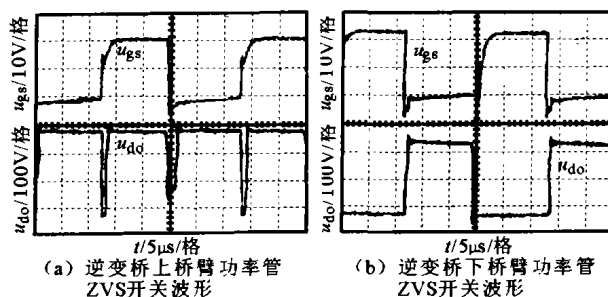


图 4 逆变桥功率开关试验波形

逆变桥上桥臂功率开关在高频脉冲直流电压波为零时开关, 实现了 ZVS 开通与关断; 逆变桥下桥

(下转第 105 页)

关器件进行相应的逻辑切换,以确定对应相绕组的通断。本系统采用开关型霍尔元件作为位置传感器,结构简单,电路实现容易。转子上固定16块永磁体,定子上霍尔元件贴片相距30°,如图7所示。

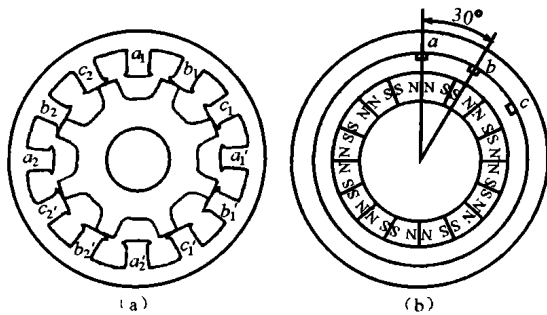
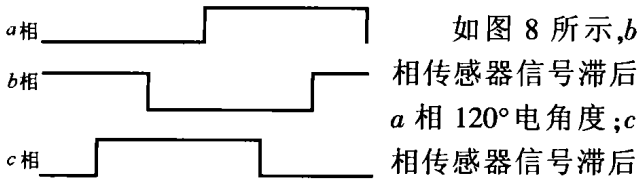


图7 位置传感器检测转子位置



如图8所示, b相传感器信号滞后 a 相 120°电角度; c相传感器信号滞后 a 相 240°电角度。根据传感器提供的信号, CPU 计算出相应的导通相,同时根据其变化率也可计算出电机转速,进行调速控制。

6 试验和仿真结果比较

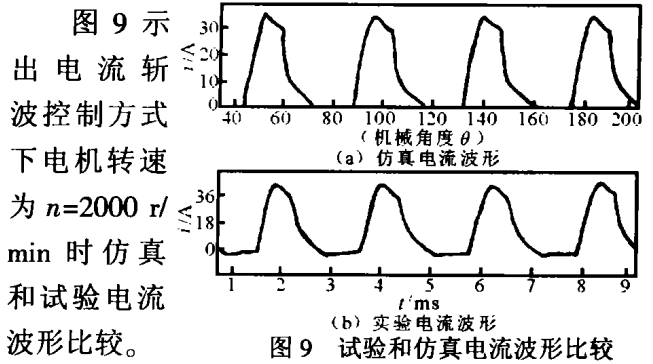


图9 试验和仿真电流波形比较

7 结束语

针对开关磁阻电动机的特性,提出了一整套不对称半桥驱动电源系统,仿真和实验表明,该驱动电源系统极具应用价值。

参考文献

- [1] 吴建华.开关磁阻电机设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 王宏华.开关磁阻电动机调速技术[M].北京:机械工业出版社,1998.

(上接第85页)

臂功率开关在其漏-源电压为零时开关,实现了ZVS开通与关断。

图5示出27V输入电压时,组合式三相高频脉冲直流环节逆变器带阻性不平衡相负载时试验波形。由图5可知: u_A, u_B, u_C 满足幅值相等、相位相差120°的关系,具有很强的带不平衡负载能力,但输出

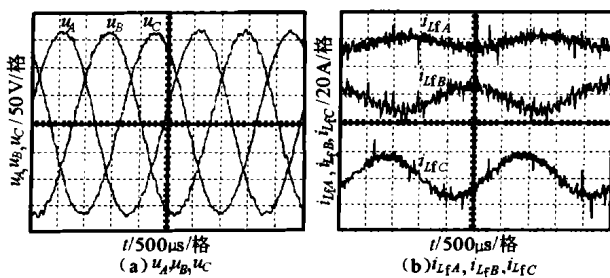


图5 A相空载、B相半载、C相满载时 $u_A, u_B, u_C, i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}$ 波形

滤波电感电流 $i_{L A, B, C}$ 受各相负载的制约不再满足120°相位关系。此时, $u_A=116V, u_B=115V, u_C=114V, \theta_{AB}=119.95^\circ, \theta_{BC}=121.91^\circ, \theta_{CA}=118.15^\circ, \Delta U_o=0.87V, \Delta \theta_o=1.91^\circ$ 。图6示出高频软开关三相逆变电源带三相150%额定负载时的试验波形。图中, u_A, u_B, u_C 满足相位相差120°的关系,但输出电压削顶, i_{LA}, i_{LB}, i_{LC} 部分饱和。

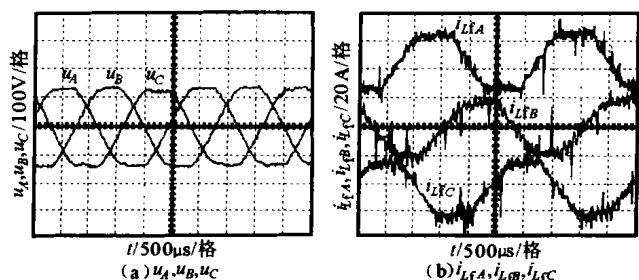


图6 150%额定负载时三相 $u_A, u_B, u_C, i_{LA}, i_{LB}, i_{LC}$ 波形

7 结论

理论分析与试验表明,所研制的3kVA 27V DC/200V 400Hz AC高频软开关三相逆变电源具有体积小、重量小、变换效率高、静态精度高、动态响应快、输入电压范围宽、输出波形质量高、过载与短路能力强、带不同性质负载和带三相不平衡负载的能力强、每相独立控制、易实现模块化结构、在线热更换、N+1模块冗余技术等优良的综合性能,具有重要的

工程应用价值。

参考文献

- [1] T M Jahns. System Design Considerations for a High Power Aerospace Resonant Link Converter[J]. IEEE Trans. on PE, 1993, 8(4): 663~671.
- [2] 陈道炼.DC-AC逆变技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 陈道炼.有源箝位正激变换器稳态分析与小信号特性[J].电工技术学报,2000,15(4):40~46.