

一种适用于Z源的滞环控制算法的研究

施胜丹¹, 黄金军²

(1. 国网电力科学研究院, 南京 210003 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 基于Z拓扑的逆变系统, 需在开关控制信号中加入直通信号。传统的滞环控制算法无法实现。针对这一局限, 提出一种新的适用于Z拓扑的定频电流滞环控制策略。该策略保留了传统滞环控制的优点; 采用定频控制, 降低了系统损耗, 便于滤波; 有了Z源的升压作用, 系统功率输出能力明显提高。通过MATLAB仿真, 并经过实验验证, 证明了该策略的可行性。

关键词: Z源逆变器; 电流滞环; 直通时间; 参考电流

中图分类号: TM464; TM132

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)03-0063-04

Research of a Kind of Hysteresis Control Algorithm Based on Z-source

SHI Sheng-dan¹, HUANG Jin-jun²

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. NARI Relays Electric Co., Ltd. Nanjing, Nanjing 211102, China)

Abstract: Z source based power inverter system, for Z topology, shoot through time must be added in the switch signals. Traditional hysteresis control algorithm can not be achieved. In response to this limitation, this paper presents a new kind of control algorithm based on fixed-frequency current hysteresis. The strategy retains the advantages of traditional hysteresis control. Because it is a fixed-frequency control, system loss was reduced, and it was easy to filter. With the boosting role of Z source, power output capability of system was improved significantly. By simulation with MATLAB and after experiments, the correctness of the strategy was proved.

Key words: Z-source inverter; current hysteresis; shoot through time; reference current

0 引言

电能变换系统中, 为达到输出指标, 通常会先对低电压等级的直流侧进行升压。Z拓扑具有很好的升降压能力, 且原理易懂, 控制简单, 只需在开关周期内加入一定的直通时间就能达到升降压的目的, 基于Z拓扑的逆变器称作Z源逆变器^[1-7]。

现用的逆变控制技术中, 以PWM技术为主, PWM技术中有一类叫跟踪型PWM逆变技术, 采用直接变量跟踪控制, 控制原理简单, 跟踪精度高, 可自动限制峰值。但由于开关频率不固定, 导致开关损耗较大, 且不方便滤波器的设计^[8-17]。

基于电流滞环控制的逆变系统的电流输出能力与直流侧电压关系密切。直流侧电压升高, 则输出极

限电流值会相应增加。笔者提出的基于Z源的电流滞环控制策略, 具有滞环控制下响应速度快、稳定性高等优点; 有效地插入直通时间, Z源升压作用明显, 从而增大功率输出; 策略采用定频控制, 减少了开关损耗, 方便了有关滤波器的设计。

1 Z源滞环控制原理

逆变主电路采用单相全桥结构, 见图1。

图1中虚线框内为Z源, U_{in} 为Z源输入电压, V_1-V_4 为IGBT, 设 $S_k(k=a, b)$ 是两桥臂的开关函数, 上管导通取1, 否则取0。设参考电流的采样周期为 T_s , 在 T_s 内, 开关函数以(0,1)、(1,1)或(0,0)或直通、(1,0)依次作用; 作用时间依次为 T_n 、 T_z 、 T_p , $T_s = T_n + T_z + T_p$ 。设定每个 T_s 内 T_z 固定。图2给出了电流滞环控制的电流轨迹。

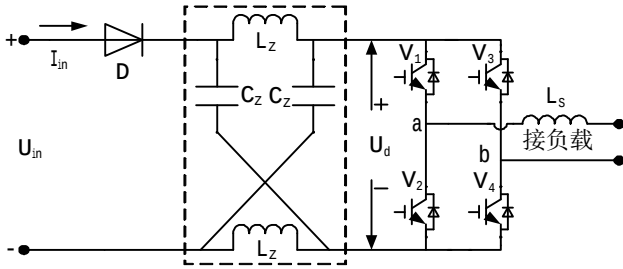


图 1 Z 源逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of Z source inverter

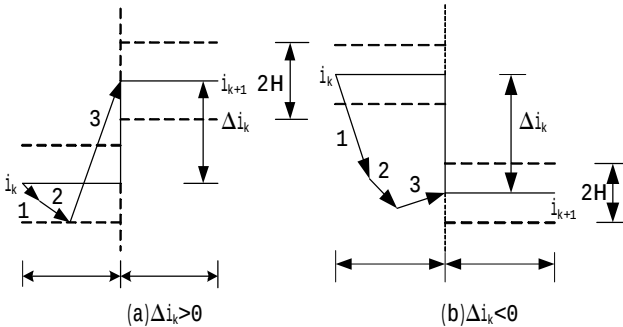


图 2 滞环控制下的电流轨迹图

Fig. 2 Current track using current hysteresis control

设 i_k, i_{k+1} 为 i_{ref} 的第 $k, k+1$ 次采样值, i_{lk} 为负载电流的第 k 次采样值, 设定环宽为 $2H, \Delta i_k = i_{k+1} - i_k$, 若 i_{ref} 下一采样周期采样值不便预测, 可令 $\Delta i_k = i_k - i_{k+1}$ 。如图 2 所示, 做如下控制要求: 在每个 T_s 内, 控制目标是在 T_s 末时刻使得 $i_l = i_{k+1}$, 这样 i_l 在 T_s 内的增量为 Δi_k 。为精确达到本周期控制目标, 加入一调节函数, 设为 $x = k_x(i_k - i_{lk})$, k_x 为大于 0 的常数。则在一个 T_s 内, i_l 的实际增量为 $\Delta i_k + x$ 。这个增量由图 2 所示的三段电流运动轨迹 1、2、3 实现, 轨迹 1 对应开关函数(0,1), 轨迹 2 对应于(1,1)、(0,0)或者直通, 轨迹 3 对应于(1,0)。

由以上的分析并结合图 2 所示电流轨迹, 可推导出:

$$\begin{cases} T_p = \frac{1}{2}(T_s - T_z) + \frac{(\Delta i_k + x)L_s + u_{lk}T_s}{2U_d} \\ T_n = \frac{1}{2}(T_s - T_z) - \frac{(\Delta i_k + x)L_s + u_{lk}T_s}{2U_d} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: L_s 为逆变输出侧串联电感值; U_d 为 Z 源输出电压; T_s, T_z 均固定; T_s 既为开关周期也是电压电流的采样周期^[8-9]。

2 算法分析

2.1 参数设计

设参考波形函数为 $f(t)$, 一阶导数为 $f'(t)$, 图 2 中三段电流轨迹的斜率分别为 K_1, K_2, K_3 , 作用时间对应为 T_1, T_2, T_3 ; 假设 K_{x_1} 表示 K_1, K_2, K_3 中与同号 $f'(t)$

的数, 若与 $f'(t)$ 同号的数多于一个, 则用 K_{x_1}, K_{x_2} 表示。不发生跟踪松弛的条件为

$$|K_{x_1}| > |f'(t)| \quad (2)$$

或

$$\left| \frac{K_{x_1}T_1 + K_{x_2}T_2}{T_{x_1} + T_{x_2}} \right| > |f'(t)| \quad (3)$$

式(2)、(3)为 L_s 的取值限制条件, 结合实际情况可推得 L_s 的大致范围为

$$0 < L_s < \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_d}{i_m}\right)^2 - R^2} \quad (4)$$

式(4)中: R 为负载; i_m 为参考正弦电流峰值。

利用传统变频滞环控制下推导出的开关周期函数选取 T_s 的值, 取 $T_s > T_{max}$ 。

由传统滞环控制易得

$$T_{max} = \frac{4U_dHL_s}{U_d^2 - (Ri_m)^2} \quad (5)$$

由式(1)经相关推导可得

$$\frac{U_d(T_s - T_z)}{T_s L_s} \geq i_m \sqrt{\omega^2 + R^2 L_s^{-2}} + \frac{k_x H}{T_s} \quad (6)$$

从式(6)可看出, 在确定 T_s, L_s 以及系统的功率范围后, 可确定 T_z 的取值范围。

2.2 开关管的控制

图 3 为开关管驱动信号图。

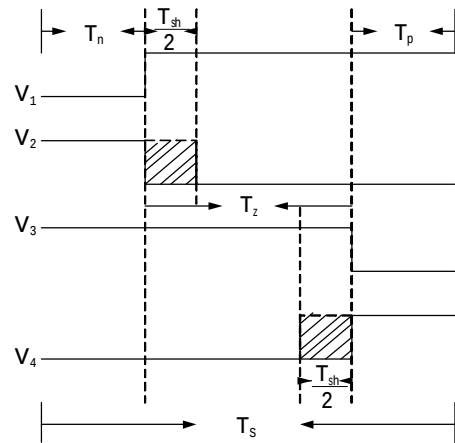


图 3 开关管驱动信号图

Fig. 3 Drive signals for switches

T_{sh} 为直通时间且 $T_{sh} \leq T_z$; 在一个 T_s 内, 以(0,1)、(1,1)、(1,0)依次控制开关管, 在状态(1,1)时间段内插入直通时间, 直通时间分两段插入。可见, 开关管工作频率为 $1/T_s$, 实现定频控制。

3 系统仿真

基本参数设定如下。

传统滞环控制模块, $T_s = 0.002H, H = 0.1, u_d = E_d = 400V$;

Z 源滞环模块 $L_s=0.002\text{H}$, $H=0.1$, $E_d=400\text{ V}$, $u_d=$
 $\frac{1}{1-2D} E_d$, $D=\frac{T_{sh}}{L_s}$, $k_x=1$, $T_s=0.000\text{ s}$, $T_z=0.1T_s$, $T_{sh}=$
 T_z , 故 $D=0.1$, $u_d=500\text{ V}$ 。

控制负载端电压保持为 $u_l=200\sqrt{2}\sin(100\pi t+\varphi)$, 现取 $R=0.8\ \Omega$, 则参考电流应为 $i_{ref}=275\sqrt{2}\sin(100\pi t+\varphi)$ 。仿真波形见图 4、5, 传统条件下波形严重畸变, 说明此参考电流值已经超过系统能承受的最大电流值。

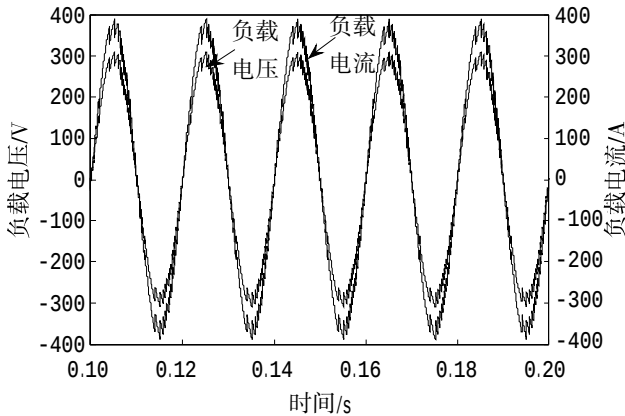


图 4 传统滞环控制下负载电流与端电压波形

Fig. 4 Load current and voltage waveform using traditional hysteresis control

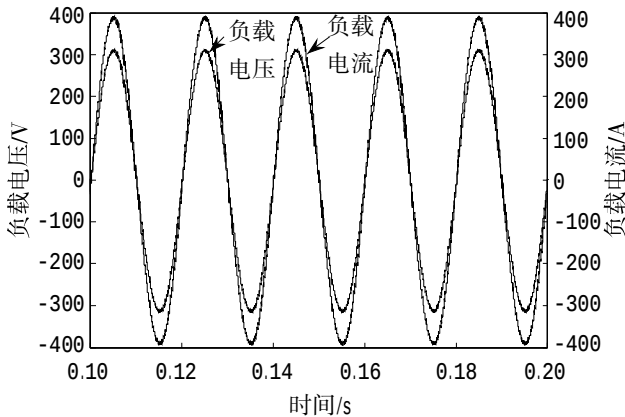


图 5 Z 源滞环控制下的负载电流与端电压波形

Fig. 5 Load current and voltage waveform using Z source based hysteresis control

Z 源滞环控制下的负载电压依然有效的被稳住, 波形并未失真, 这证明了在该算法下, 利用 Z 源的升压作用, 系统输出电流能力大大加强, 图 6 为 Z 源输出电压波形。

4 实验验证

为验证算法的可行性, 初步做了小功率实验。控制部分采用工业控制板 LT8503。

主电路包括直流电源、Z 拓扑、滤波电感、负载,

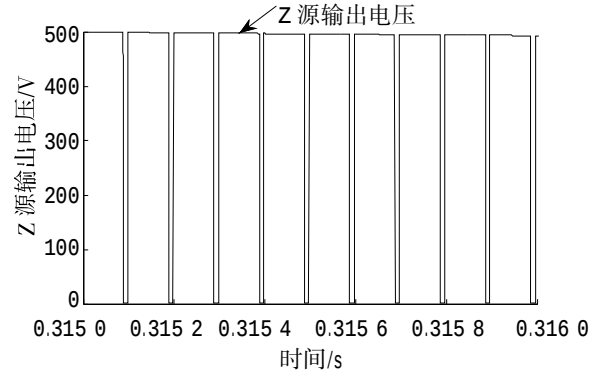


图 6 Z 源输出电压波形

Fig. 6 Output voltage waveform of Z source

IGBT 采用 SEMIKRON 公司的 SKM 300 GB 174 D。直流电源电压在 70 V 左右, Z 源输出峰值电压理论上应在 88 V 左右。由于条件的限制, 现控制负载端电压稳定在 68 V(峰值)左右, 实验波形见图 7、8。

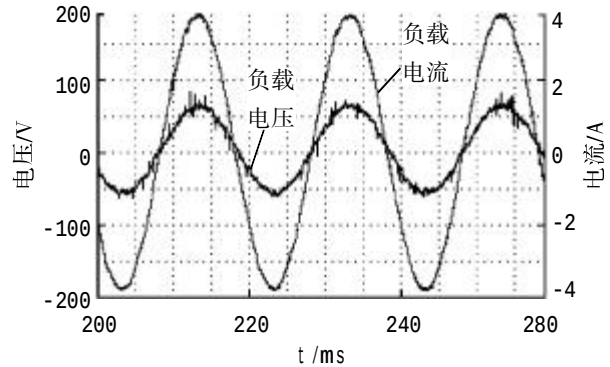


图 7 $R=20\ \Omega$ 时的负载电流与电压波形

Fig. 7 Load current and voltage waveform when $R=20\ \Omega$

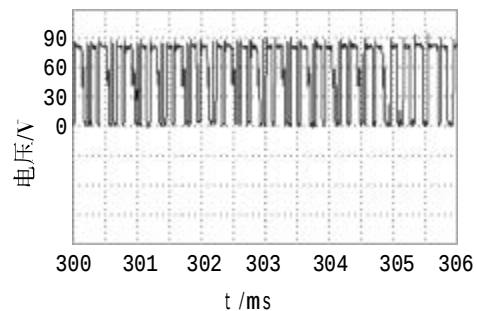


图 8 Z 源输出电压波形

Fig. 8 Output voltage waveform of Z source

5 结语

根据滞环控制的特点, 固化开关周期(T_s)与零电压作用时间(T_z), 从而实现定频控制且为 Z 源直通状态的插入提供时间区间。通过与传统滞环策略的仿真比较, 证明在新的 Z 源滞环算法下, 直流侧电压经 Z 源成功升压, 逆变系统输出功率较传统滞环控制下的逆变系统明显增加。实验验证中, 证实 Z 源

能成功升压,负载端电压电流波形畸变很小。可见,笔者提出的Z源滞环算法将Z源与滞环成功结合,具有一定的研究价值与应用空间。

参考文献:

- [1] 蒋立,郑建勇. Z源光伏并网直接电流单周控制系统[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 91-94.
JIANG Li, ZHENG Jian-yong. A direct current one-cycle control method for z-source grid-connected photovoltaic system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 91-94.
- [2] 蔡磊,钱照明,彭方正. Z源单相并网逆变器控制的实现[J]. 电力电子技术, 2008, 42(7): 14-16.
CAI Lei, QIAN Zhao-ming, PENG Fang-zheng. The control of a Z-source single phase grid-connected inverter [J]. Power Electronics, 2008, 42(7): 14-16.
- [3] 彭方正,房绪鹏,顾斌,等. Z源变换器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 9-11.
PENG Fang-zheng, FANG Xu-peng, GU Bin, et al. Z source inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 9-11.
- [4] 雷元超,陈春根,陈国呈. 滞环比较PWM跟踪控制分析[J]. 水电能源科学, 2004, 22(1): 83-85.
LEI Yuan-chao, CHEN Chun-gen, CHEN Guo-cheng. Tracking control of PWM hysteresis analysis [J]. Hydroelectric Energy, 2004, 22(1): 83-85.
- [5] SHEN Miao-sen, WANG Jin, JOSEPH A, et al. Maximum constant boost control of the Z-source inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2004, 13(1): 142-147.
- [6] SHEN Miao-sen, WANG Jin, JOSEPH A, et al. Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2006, 42(3): 770-777.
- [7] RAJAKARUNA S, JAYAWICKRAMA Y R L. Designing impedance network of Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2004, 22(4): 1-6.
- [8] 郑建勇,黄金军,尤鋈,等. 基于电流滞环控制的Z源光伏并网系统研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 61-67.
ZHENG Jian-yong, HUANG Jin-jun, YOU Jun, et al. Research on Z source based current hysteresis control used in photovoltaic grid-connected system [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(5): 61-67.
- [9] 黄金军,郑建勇,尤鋈,等. 基于电流滞环控制的Z源三相光伏并网系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 94-97.
HUANG Jin-jun, ZHENG Jian-yong, YOU Jun, et al. Z-source three-phase grid-connected PV system based on current hysteresis control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 94-97.
- [10] 戴训江,晁勤. 一种新颖的并网逆变器自适应电流滞环控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 85-89.
DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Adaptive current hysteresis control of grid-connected inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 85-89.
- [11] 顾和荣,杨子龙,郭伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 108-112.
GU He-rong, YANG Zi-long, WU Wei-yang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 108-112.
- [12] 董密,罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 97-102.
DONG Mi, LUO An. Design and control strategies of inverters for a grid-connected photovoltaic power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 97-102.
- [13] 张超,何湘宁. 一种用于光伏发电系统的新型高频逆变器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 51-53.
ZHANG Chao, HE Xiang-ning. A novel high-frequency DC link inverter for grid-connected photovoltaic system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 51-53.
- [14] PENG F Z, JOSEPH A, WANG J, et al. Z-source inverter for motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 857-863.
- [15] PENG F Z. Z-source inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2003, 39(2): 504-510.
- [16] PENG F Z, YUAN Xiao-ming, FANG Xu-peng, et al. Z-source inverter for adjustable speed drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics Letters, 2003, 1(2): 33-35.
- [17] 吴华波,曾素琼. 光伏并网逆变器合闸方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 24-28.
WU Hua-bo, ZENG Su-qiong. Study on closing method of the PV grid-connected inverter [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 24-28.

施胜丹(1985—),女,硕士,主要研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用。

黄金军(1986—),男,硕士,主要研究方向为电力电子与
电力传动。