

数字单周控制的三相三开关APFC电路的研究

探讨了一种应用于三相三开关三电平高功率因数整流器的数字单周控制策略。详细分析了单周控制原理,并推导出其单周控制的数字控制规律。构建了三相三开关三电平整流器的Matlab仿真模型,并以TMS320F28035作为控制核心,搭建一台10 kW的实验样机。仿真和实验结果表明基于数字单周控制的三相三开关三电平整流器具有控制算法简单、系统可靠稳定、动态响应快且功率因数高的优点。

李秋如 李志忠 兰尚荣/广东工业大学信息工程学院

0 引言

随着人们对有源功率因数校正(Active Power Factor Correction, APFC)整流装置提出大容量、高性能的要求,传统的两电平功率变换器难以满足。三相三开关三电平整流器由于具有开关信号少,功率开关管电压应力低^[1],三相可同时导通等优点,使其在中大功率领域得到了广泛的应用。

在APFC控制策略中,平均电流模式控制采样信号多,电路设计复杂,矢量控制的控制算法复杂,而单周期控制技术是一种非线性控制技术^[2-3],它对开关输出信号在一个开关周期内的平均值进行瞬时控制,能够实现快速跟踪控制信号、消除稳态和瞬态误差的目的,而且鲁棒性好,电路实现简单^[4]。同时,数字单周控制技术解决了模拟控制中积分常数容易受器件参数影响的问题^[5]。在此,将数字单周控制技术应用于三相三开关三电平整流器中,既降低了开关管的电压应力,同时减小了控制回路的设计难

度,提高了系统可靠性。

1 单周期控制原理

为了方便得到三相三电平三开关整流器的单周控制数学方程,先作如下假设:①电路已达稳态,电感电流工作在CCM;②开关频率远高于电网电压电频率,在一个开关周期内,认为电网电压不变;③在直流母线侧,认为电容 $C_1 = C_2$,且其两端电压 $u_{C1} = u_{C3} = u_{dc}/2$;④导线及电感电阻为零,开关器件导通压降为零,所有电路元件均视为理想元件;⑤三相输入电感 $L_a = L_b = L_c = L$ 。

如图1所示,忽略电感两端的电压,节点A、B及C相对于中性点O的电压为: $U_{AO} = U_{AM} + U_{MO}$, $U_{BO} = U_{BM} + U_{MO}$, $U_{CO} = U_{CM} + U_{MO}$ 。在三相平衡系统中, $v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} = 0$,可得 $U_{MO} = -(U_{AM} + U_{BM} + U_{CM})/3$,上式整理可得

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{AM} \\ v_{BM} \\ v_{CM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

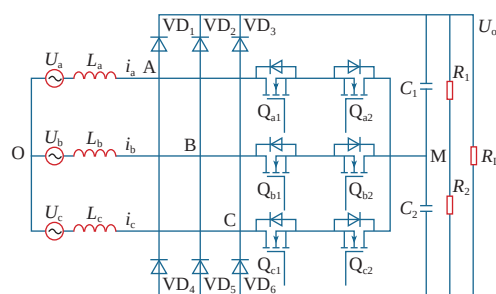


图1 三相三开关三电平的主电路拓扑

根据假设,在每个开关周期的 v_{AM} 、



李秋如/硕士研究生

关键词/Keywords

数字控制 ·
单周控制 ·
三相三开关 ·
有源功率因数校正 ·

广东省科技计划项目(2013B011301011), 东莞市科技计划项目(2012108102052)。

v_{BM} 和 v_{CM} 平均值为

$$\begin{cases} v_{AM} = (1-d_a) \frac{E}{2} \text{sign}(i_a) \\ v_{BM} = (1-d_b) \frac{E}{2} \text{sign}(i_b) \\ v_{CM} = (1-d_c) \frac{E}{2} \text{sign}(i_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中, d_a 、 d_b 和 d_c 分别为三相开关的占空比, $\text{sign}(i_n)$ 为符号函数

$$\text{sign}(i_n) = \begin{cases} 1 & i_n \geq 0 \\ -1 & i_n < 0 \end{cases} \quad n=a,b,c \quad (3)$$

三相单位功率因数校正 (Power Factor Correction, PFC) 的控制目标为 $v_a = R_e i_a$, $v_b = R_e i_b$, $v_c = R_e i_c$, 其中 R_e 为输入等效电阻, 整理式 (2) 可得

$$\begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1-d_a)\text{sign}(i_a) \\ (1-d_b)\text{sign}(i_b) \\ (1-d_c)\text{sign}(i_c) \end{pmatrix} = \frac{R_s}{V_m} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, R_s 为三相输入电流等效检测电阻; V_m 为反馈电压误差补偿器的输出; $V_m = ER_s/2R_e$ 。解得

$$\begin{cases} V_m(1-d_a) = R_s |i_a| \\ V_m(1-d_b) = R_s |i_b| \\ V_m(1-d_c) = R_s |i_c| \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 为该整流器实现单周期控制的关键方程。其中三相输入电流的绝对值可以通过采用精密全波整流电路来实现。

2 单周数字PFC实现

根据单周期控制的原理, 式 (5) 又可以等效为

$$R_s |i_{(abc)}| = \frac{1}{T_s} \int_0^{\bar{d}T_s} u_m d\tau \quad (6)$$

式中, $\bar{d}$ 为 $(1-d)$ 。

由于数字控制系统的采样频率远高于输入电流频率, 在每个开关周期内只采样一次, 且采样频率通常等于开关频率, 故可以认为在一个开关周期内 $i_{(abc)}$ 和 u_m 保持恒定。式 (6) 可变换为

$$\begin{cases} u_1(t) = \frac{R_s |i_{(abc)}(nT_s)|}{u_m(nT_s)} \\ u_2(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{\bar{d}T_s} d\tau \quad 0 \leq t \leq T_s \end{cases} \quad (7)$$

由此给出三相三开关三电平整流器数字单周控制策略结构框图, 如图2所示。该策略采用电压外环和单周期控制内环来实现, 其中电压外环的作用是稳定直流母线输出电压, 单周控制内环的作用是使输入电流与输出电压相位一致。控制原理如下: 输出电压 u_{dc} 与参考输出电压 u_{ref} 的误差信号经电压调节器得到 u_m , u_m 与采到的三相输入电流的绝对值运算结果 $|R_s i_{abc}|$ 相除, 得到三相的单周期控制量 u_1 , 然后与斜坡发生器输出 u_2 进行比较, 当 u_1 小于 u_2 时开关关断; 反之, 开关导通。比较器输出的PWM信号通过驱动电路, 得到适当的PWM波形, 用于控制三相三开关三电平整流器的三相电流输入波形。

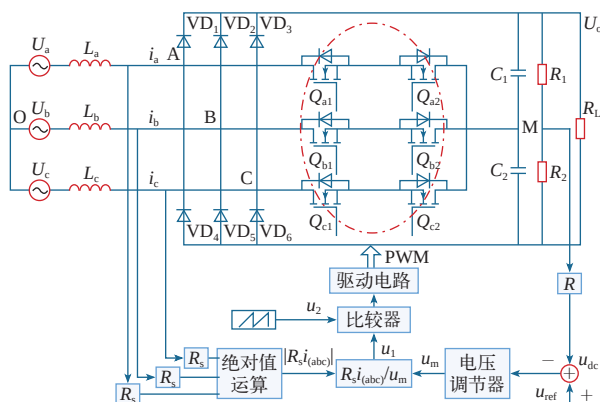


图2 三相三开关三电平整流器结构框图

3 仿真及实验验证

针对上述分析, 基于Matlab平台, 搭建了该整流器的仿真模型, 如图3、图4所示。电路参数如下: 三相输入线电压 $U_{in} = 380$ V, 输出直流电压 $U_o = 700$ V, 开关频率 $f_s = 50$ kHz, 三相输入电感 $L = 640$ μ H, 输出滤波电感 $C = 820$ μ F。图5分别给出了采用单周控制, 整流器负载减半, 负载功率从5 kW突变为10 kW和输入电压从380 V突变为320 V时, 三相三开关三电平整流器的三相输入电流 i_a 、 i_b 和 i_c 的变化波形。可见, 三相输入电流均在一个开关周期内消除误差, 重新达到稳态, 有较快的

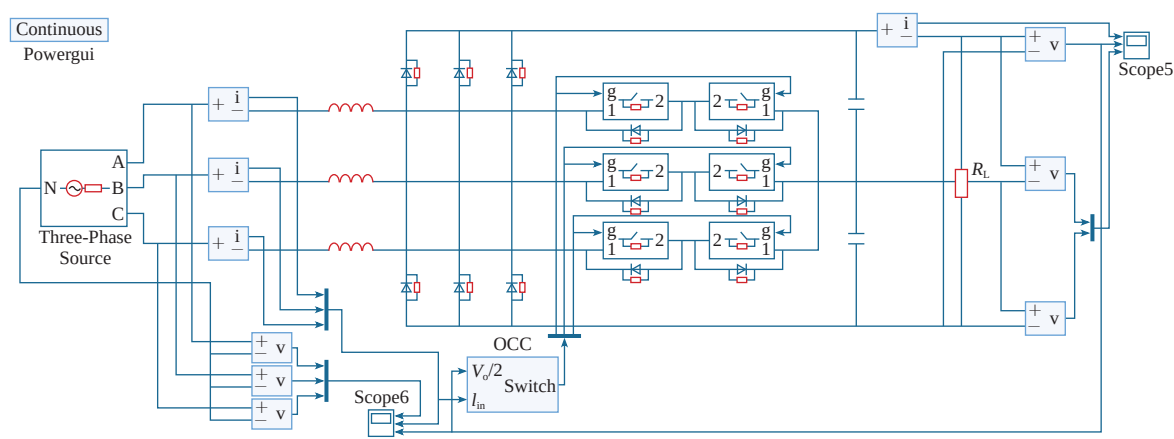


图3 三相三开关三电平整流器的Matlab仿真框图

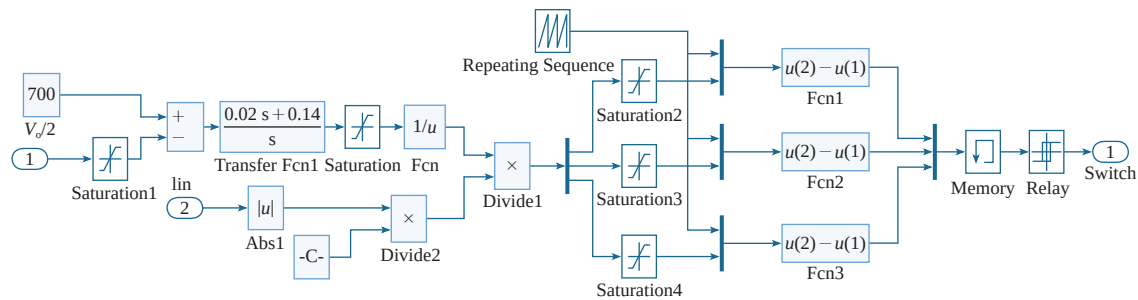


图4 单周控制仿真框图

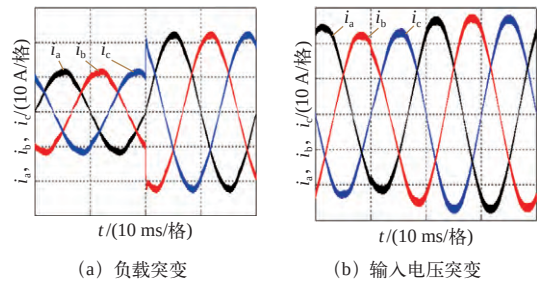


图5 三相输入电流波形

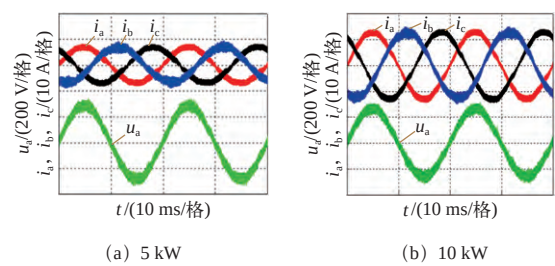


图6 A相输入电压波形和三相输入电流波形

动态响应速度。

根据前面的仿真电路，搭建了一台三相输入 380 V，额定输出700 V/10 kW的实验样机。主控芯片为TI公司TMS320F28035 定点DSP，开关器件 IGBT采用英飞凌公司的IGBT IKW40N120T2。图6 为该整流器在输出功率分别为5 kW、10 kW的情况下，三相输入电流 i_a 、 i_b 和 i_c 及A相输入电压 u_a 实验波形。

从图6可以看出，10 kW输入电流波形优于5 kW 情况，在输入电流过零点附近，电流能实现平滑过渡，畸变率低，实现了PFC的目的。

下表给出了在输出功率分别为5 kW、7 kW和 10 kW的情况下电流总谐波畸变率（THD）和功率因数（PF）值。从下表可以看出，在不同的负载下，三相输入电流 THD均小于3%，PF均大于 0.99，表明在数字单周控制下，能较好实现功率因数校正的目的。

表 单周控制三相三开关三电平整流实验数据

输出功率 /kW	A相		B相		C相	
	THD(%)	PF	THD(%)	PF	THD(%)	PF
5	2.058 2	0.993 7	1.789 5	0.994 6	2.089 0	0.990 1
7	1.486 1	0.997 1	1.378 5	0.996 8	1.763 6	0.994 7
10	1.609 6	0.998 8	1.413 5	0.998 6	1.536 5	0.997 5

4 结束语

本文详细分析了三相三开关三电平单周期控制的工作原理并推导出其控制方程, 针对模拟单周期PFC技术的缺点, 提出了一种单周期PFC数字控制方案。该数字控制算法简单, 易于修改, 大大简化了硬件电路的设计, 而且响应速度快。最后通过仿真及实验验证, 证明了控制策略应用于三相三开关三电平高功率因数整流器的可行性。

参考文献

- [1] Guanghai G, Heldwein M L, Drofenik U, et al. Comparative evaluation of three-phase high-power-factor AC-DC converter concepts for application in future More Electric Aircraft [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (3) : 727-737.
 - [2] Zheren Lai, Keyue Ma Smedley. A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator [J]. IEEE Transactions on Power Electron, 1998, 13 (3) : 501-510.
 - [3] Smedley K M, Cuk S. One-cycle control of switching converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (6) : 625-633.
 - [4] 陈延明, 杨兴龙, 万宗东, 等. 基于单周控制的有源功率因数校正电路设计 [J]. 电力电子技术, 2006, 40 (4) : 89-90.
 - [5] Ghodke D V, Chatterjee K, Fernandes B G. Modified one-cycle controlled bidirectional high-power-factor AC-to-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (6) : 2459-2472.
- (收稿日期: 2015-12-25) EA
-
- (上接第35页)
- [12] Kojovic L, Hassler S. Application of current limiting fuses in distribution systems for improved power quality and protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (2) : 791-800.
 - [13] Moriconi F, Francisco D L R, Singh A, et al. An innovative compact saturable-core HTS fault current limiter—development, testing and application to transmission class networks [C]. IEEE PES General Meeting, 2010: 1-8.
 - [14] Meyer C, Schroder S, De Doncker R W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5) : 1333-1340.
 - [15] Smith R K, Slade P G, Sarkozi M, et al. Solid-state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3) : 1155-1164.
 - [16] Steurer M, Frohlich K, Halaus W, et al. A novel hybrid current-limiting circuit breaker for medium voltage: principle and test results [J]. IEEE Power Engineering Review, 2003, 18 (2) : 62-62.
 - [17] Perez E, Barros J. A proposal for on-line detection and classification of voltage events in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (4) : 2132 - 2138.
 - [18] Zhang X, Ming L. Using the fault current limiter with spark gap to reduce short-circuit currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (1) : 506-507.
 - [19] 李庆民. 电力系统经济型故障限流技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
 - [20] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分) [M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- (收稿日期: 2016-03-07) EA