

一种三相整流器的自然切换电流峰值控制策略

马伏军¹, 匡德兴¹, 田雄², 朱真^{1†}, 王逸超², 王立娜²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082;

2. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南长沙 410004)

摘要:给出了T型三电平整流器的直流侧电压与交流侧电流的自然开关轨迹. 基于该轨迹, 将直接功率控制理论与自然开关轨迹理论结合, 给出了自然切换控制方法. 在该控制方法下, 负载扰动时, 输出电流超调严重, 系统动态过程不平滑. 针对该现象, 依据直流变换器中电流峰值控制的思想, 提出了适用于自然切换控制方法的电流峰值控制策略, 即在原有自然开关轨迹上增加第三运行轨迹, 对输出电流直接限幅控制, 使得系统动态过程更为平滑. 并在 Matlab 2019a 仿真环境中进行了验证.

关键词:T型三电平; 瞬时功率理论; 直接功率控制; 自然开关轨迹; 电流限幅; PWM 整流器

中图分类号: TM 46

文献标志码: A

A Natural Switching Current Peak Control Strategy for Three-phase Rectifier

MA Fujun¹, KUANG Dexing¹, TIAN Xiong², ZHU Zhen^{1†}, WANG Yichao², WANG Lina²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co. Ltd, Changsha 410004, China)

Abstract: The natural switching trajectories of direct-current (DC) side voltage and AC side current of T-type three-level rectifier are presented in this paper. Based on this trajectory, the natural switching control method is developed by combining the direct power control theory with the natural switching trajectory theory. Under this control method, when the load is disturbed, the output current overshoot is serious and the dynamic process of the system is not smooth. In view of this phenomenon, according to the idea of current peak control in DC converter, a current peak control strategy suitable for natural switching control method is proposed, that is, adding a third running track to the original natural switching track and directly limiting the output current, so as to make the dynamic process of the system more smooth. It is verified in MATLAB 2019a simulation environment.

Key words: T-type three-level; instantaneous power theory; direct power control; natural switch trajectory; current limiting; PWM rectifier

* 收稿日期: 2021-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977067), National Natural Science Foundation of China (51977067)

作者简介: 马伏军(1985—), 男, 湖南汉寿人, 湖南大学教授、博士生导师

† 通信联系人, E-mail: 332120507@qq.com

随着各行业对电能质量的要求提高和电力电子技术的发展,在许多应用场合中,PWM整流器因功率因数可控、网侧电流谐波小、能量可双向流动等特点,逐渐取代传统二极管和相控整流器^[1-2].

T型三电平(Three-level T-type NPC, TNPC)整流器是中点箝位型整流器的改进拓扑,TNPC结合了两电平整流器的优点,如低导通损耗、器件数目少和工作原理简单,以及三电平变换器的优点,如低开关损耗和较高输出电压质量^[3-6].TNPC具有输出谐波低、效率高等特点,在诸如储能等领域应用越来越多.TNPC控制策略复杂,对TNPC整流器的控制研究主要是一些传统控制方法.TNPC整流器目前高性能的控制策略有电压定向矢量控制(Voltage Oriented Control, VOC)和直接功率控制(Direct Power Control, DPC)^[1-3,7].与VOC相比,DPC无需对电网电压进行锁相,控制更为简单.且由于是对输出功率直接控制,控制对象包含交流侧电流及网侧电压信号,控制的动态性能更佳.

一个性能要求较高的系统,在负载发生改变时,应当具有快速的动态响应,以减轻动态响应过程中可能出现的输出电压不可控等问题.针对电压型PWM整流器,文献[8]提出了利用动态过程中的无功电流来提高有功电流动态响应速度的一种新的控制方法,控制效果较好.文献[9-11]给出了一种自然切换方法控制直流变换器,系统响应速度快、控制精确度高.文献[12]提出了自然开关轨迹(Natural Switching Surface, NSS)在两电平整流器中的应用,相较传统两电平控制方法,自然切换方法响应速度更快,但没有解决电流超调严重的问题.

考虑三电平与两电平整流器的差异性,如交直流侧能量流动问题,电容中点电压平衡问题,开关矢量选择的复杂性等^[13-18],本文将研究T型三电平整流器的一种基于自然开关轨迹和直接功率控制的自然切换控制方法(NSS-DPC).相较传统的DPC,NSS-DPC控制方法无需电压外环控制,有更好的动态性能.针对该方法电流超调严重这一问题,根据直流变换器中电流峰值控制的思想,文中提出一种电流限幅控制策略,在原有自然切换轨迹图上新加第三运行轨迹,有效实现了电流峰值的控制效果.

1 TNPC 整流器

1.1 主电路及数学模型

T型三电平整流器结构如图1所示.图中, L_s 和

R_s 为交流侧电感和电阻值, C_1, C_2 为直流侧电容, $e_a \sim e_c$ 为电网电压, $i_a \sim i_c$ 为网侧电流, i_{dc} 为直流侧电流, u_{dc1} 和 u_{dc2} 为两电容两端电压.

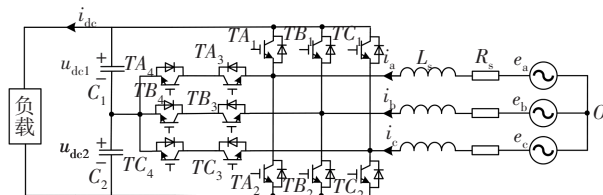


图1 T型三电平拓扑结构

Fig. 1 T-type three-level topology

可得T型三电平在dq坐标系下整流器交流侧的数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d + \omega Li_q - u_d - R_s i_d \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - \omega Li_d - u_q - R_s i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中, e_d 和 e_q , i_d 和 i_q , u_d 和 u_q 分别为dq坐标系下网压、网侧电流、整流器交流侧电压.

假设开关管为理想器件,在换相过程中没有功率损失和能量储存,根据参考文献得出整流器直流侧数学模型^[14]:

$$\frac{1}{2} (C_1 \frac{du_{dc1}}{dt} + C_2 \frac{du_{dc2}}{dt}) = \frac{3(u_d i_d + u_q i_q)}{2u_{dc}} - i_{dc} \quad (2)$$

1.2 DPC 控制

1.2.1 控制原理

三电平PWM整流器DPC控制原理如图2所示,图中 S_p, S_q, S_n 分别为有功、无功和中点电压平衡的开关表选择信号.通过各采样信息得到中点电压和母线电压,与给定参考值比较后,通过控制器得到参考有功功率,文中给定参考无功功率为零.交流侧采样得到瞬时有功和无功功率,将有功功率和无功功率与参考的差值及中点电压偏差输入至滞环比较器中,给出开关表选择信号 S_p, S_q, S_n ,开关矢量表输出各开关管动作指令,实现对三电平PWM整流器的控制.

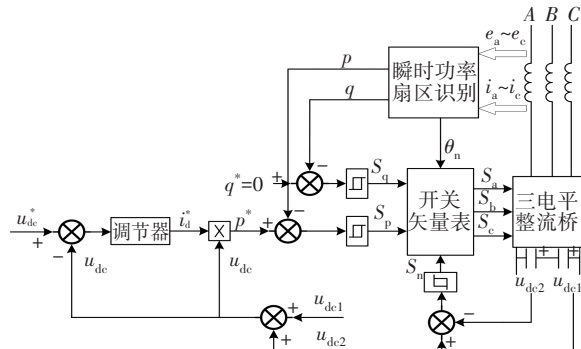


图2 三电平PWM整流器DPC控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram for three-level PWM rectifier

1.2.2 开关矢量表

如图3所示,TNPC整流器的电压空间矢量有27个($V_{25/26/27}$ 为零矢量),空间矢量图划分为12个扇区.

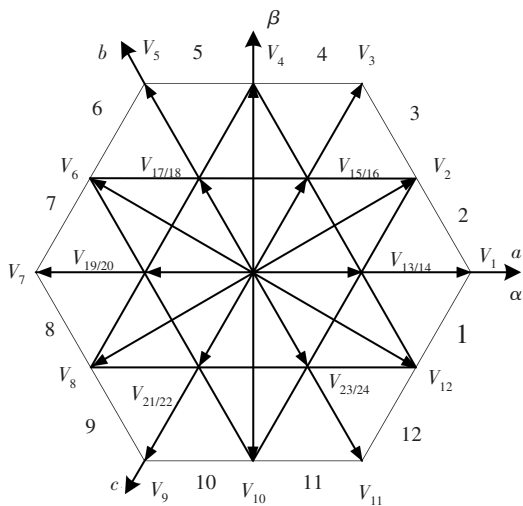


图3 三电平变换器空间矢量图

Fig. 3 Space vector diagram of three-level converter

根据矢量在不同扇区对有功和无功功率的作用效果不同,可在不同扇区选择合适矢量实现功率控制,开关表性能的好坏将直接影响输出效果.

在选择输出矢量时,应保证矢量切换不会引起线、相电压的高幅值的跳变,以防单管承受过大的 dv/dt ^[1-2].而矢量切换发生在相邻矢量间时,可达到以上目的.根据这一原则设计开关表,如表1所示.

表1 三电平PWM整流器DPC开关表

Tab.1 DPC switch table of three level PWM rectifier

$S_p S_q$	θ_1	θ_{2k}	θ_{2k+1}	θ_{12}
10	$V_{23/24}$	$V_{2k+11/2k+12}$	$V_{2k+11/2k+12}$	$V_{23/24}$
11	$V_{13/14}$	$V_{2k+13/2k+14}$	$V_{2k+13/2k+14}$	$V_{13/14}$
00	V_{12}	V_{2k-1}	V_{2k}	V_{11}
01	V_1	V_{2k}	V_{2k+1}	V_{12}

表中, $k \in [1, 2, 3, 4, 5]$, $\theta_1 - \theta_{12}$ 对应图3中标注的1-12个扇区, $V_1 - V_{24}$ 对应24个非零矢量.

1.2.3 中点电压平衡控制

直流侧两电容电压大小偏差过大,将导致中点电压不平衡,使整流器输出较多谐波分量,需对中点电压平衡控制.由表1可以看出,当 $S_p=1$ 时,即有功功率输出需要增大,正负小矢量对输出有功的作用相同,但两种矢量对中点电压的作用相反^[1-3,19].根据

电容偏差滞环比较器输出的开关表选择信号 S_n ,以及交流侧电流方向判断正负小矢量对中点电压升高或降低的影响,确定待选择的冗余矢量,使电容电压动态平衡.

2 自然开关轨迹

2.1 标么化

为取得单位功率因数,文中将无功功率参考值设为0,即令交流侧电流q轴分量为0,同时忽略交流侧电阻,给定两电容值大小均为 C .化简式(1)和式(2),得出TNPC数学模型如式(3):

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - u_d \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3u_d i_d}{u_{dc}} - 2i_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

交流侧电感电流与直流侧电压的关系随着整流器交流侧输出电压变化而变化,两者之间的关系称为自然开关轨迹.文中从电感电流增大和减小两方面来分析该轨迹.在dq坐标系下,整流器交流侧电压矢量有如下关系:

$$\max(|u_d|) = \sqrt{2/3} u_{dc} \quad (4)$$

为得到一个规范化的表示方法,选取参考电压 V_r ,对系统中电压和电流等量做出如下标么化处理:

$$\begin{cases} v_{xn} = v_x / V_r \\ i_{xn} = \frac{i_x}{V_r} Z_0 \\ t_n = t f_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_0 = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})}$; v_x, i_x 为实际电压电流值, v_{xn}, i_{xn} 为标么化后的电压电流值; $Z_0 = \sqrt{L/C}$,为特征阻抗.

2.2 自然开关轨迹

当 i_d 电流减小时,即有功功率减小,由式(4),令 $u_d = \sqrt{2/3} u_{dc}$.则式(3)可化为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - \sqrt{2/3} u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \sqrt{6} i_d - 2i_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)将式(6)标么化后得:

$$\begin{cases} \frac{di_{dn}}{dt_n} = 2\pi(e_{dn} - \sqrt{2/3} u_{dcn}) \\ \frac{du_{dcn}}{dt_n} = 2\pi(\sqrt{6} i_{dn} - 2i_{dcn}) \end{cases} \quad (7)$$

则有:

$$\frac{d^2 i_{dn}}{dt^2} + 8\pi^2 i_{dn} = \sqrt{2/3} \cdot 8\pi^2 i_{dcn} \quad (8)$$

在参考运行点, i_{dn_ref} 为目标点电流, 不考虑整流器自身损耗, 有,

$$u_{dcn} = V_m, i_{dn} = i_{dn_ref} \quad (9)$$

$$\begin{cases} V_m = 1 \\ i_{dn_ref} = \frac{2u_{dcn} i_{dcn}}{3u_{dn}} = \sqrt{2/3} i_{dcn} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(6)-(10), 可得出自然轨迹 λ_1 为:

$$(\sqrt{3/2} i_{dn} - i_{dcn})^2 + (u_{dcn} - \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (V_m - \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (\sqrt{3/2} - 1)^2 i_{dcn}^2 = 0 \quad (11)$$

观察式(11)并将其改写为:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2 \quad (12)$$

有: $x = \sqrt{3/2} i_{dn}, x_0 = i_{dcn}, y = u_{dcn}, y_0 = \sqrt{3/2} e_{dn}$,

$$r = \sqrt{(V_m - \sqrt{3/2} e_{dn})^2 + (\sqrt{3/2} - 1)^2 i_{dcn}^2} \quad (13)$$

从式(12)可以看出, 整流器在 i_d 电流减小时的自然轨迹是一个以标么化交流 d 轴网压分量和标么化直流侧电流为中心的圆。

同理, 当 i_d 电流增大, 即有功功率增大, 由于式(4), 取 $u_d = -\sqrt{2/3} u_{dc}$. 可得出自然轨迹 λ_2 :

$$(\sqrt{3/2} i_{dn} + i_{dcn})^2 + (u_{dcn} + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (V_m + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (\sqrt{3/2} + 1)^2 i_{dcn}^2 = 0 \quad (14)$$

$$-(V_m + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (\sqrt{3/2} + 1)^2 i_{dcn}^2 = 0$$

观察该式并将其改写为:

$$(m - m_0)^2 + (n - n_0)^2 = l^2 \quad (15)$$

有: $m = \sqrt{3/2} i_{dn}, m_0 = -i_{dcn}, n = u_{dcn}, n = -\sqrt{3/2} e_{dn}$,

$$l = \sqrt{(V_m + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 + (\sqrt{3/2} + 1)^2 i_{dcn}^2} \quad (16)$$

令 $i_{Ldn} = \sqrt{3/2} i_{dn}$, 在负载突变时, 两条自然轨迹绘图如图4所示. 图4中, A点为初始运行点, B点为自然轨迹切换点, C点为目标运行点.

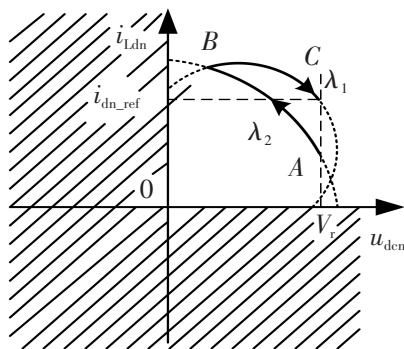


图4 负载突变时自然轨迹图

Fig. 4 NSS under sudden load change

3 自然切换控制律

直流侧电压 u_{dc} 受有功影响, 而瞬时有功的变化即为 i_d 的变化. 根据上文中得到的自然轨迹图4, 在负载突变时, 可通过选择不同的开关矢量来改变瞬时有功功率, 使 u_{dc} 与 i_d 运行在预设的轨迹上.

根据T型三电平PWM整流器的自然轨迹与目标工作点的交点定义控制律. 当直流侧电压小于参考电压时, 根据自然轨迹 λ_1 定义控制律, 定义为 σ_1 . 当直流侧电压大于参考电压时, 根据自然轨迹 λ_2 定义控制律, 定义为 σ_2 .

控制律如下:

当 $u_{dcn} < 1$ 时:

如 $\sigma_1 < 0, S_p = 1$, 否则 $S_p = 0$

当 $u_{dcn} > 1$ 时:

如 $\sigma_2 > 0, S_p = 0$, 否则 $S_p = 1$

其中:

$$\sigma_1 = (\sqrt{3/2} i_{dn} - i_{dcn})^2 + (u_{dcn} - \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (V_m - \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (\sqrt{3/2} - 1)^2 i_{dcn}^2 \quad (17)$$

$$\sigma_2 = (\sqrt{3/2} i_{dn} + i_{dcn})^2 + (u_{dcn} + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (V_m + \sqrt{3/2} e_{dn})^2 - (\sqrt{3/2} + 1)^2 i_{dcn}^2 \quad (18)$$

S_q 和 S_n 与图2所示传统三电平直接功率控制方法相同. 直流侧负载发生变化时, i_{dn} 的值发生变化, 控制律将改变整流器开关状态, 输出的 S_p 和 S_q 发生相应改变, 使得 i_{dn} 运行在上述增大(减小)的自然轨迹上, 直至两自然轨迹的交点, 而后在减小(增大)的自然轨迹上运行至目标点.

4 第三切换轨迹修正

4.1 电流峰值控制

采用电流峰值控制使得DC/DC变换器具备限流保护功能, 提高了可靠性^[20]. DC/DC变换器中采用直接对输出电流波形反馈限幅的峰值控制方法, 对限幅电流的输出动态效果较好、调节迅速. 而在交流变换器中一般采用控制环节调节器限幅的方法, 使得调节器的输出固定在一定范围内, 间接限制输出电流. 相较于直接控制的方法, 间接限制方法调节过程较长, 不利于对限幅电流的快速控制. 文中依据DC/DC变换器电流峰值控制的思想, 在T型三电平变换器的自然切换控制中提出电流峰值控制的方法, 直接对输出电流进行限制.

4.2 控制律修正

依照上述电流峰值控制思想,对控制律进行修正.根据图4所示负载突变时的自然轨迹图可看出,在负载突变时按照文中所述自然切换控制法对变换器进行控制,由于是按照最大自然轨迹切换进行控制,会使得电流 i_d 比传统DPC控制方法超调现象更严重.为了抑制电流的超调,可对切换面进行一定的改进,即在电流达到限幅值 I_{th} 时,让其运行在新的轨道上,该条轨迹为第三切换轨迹.

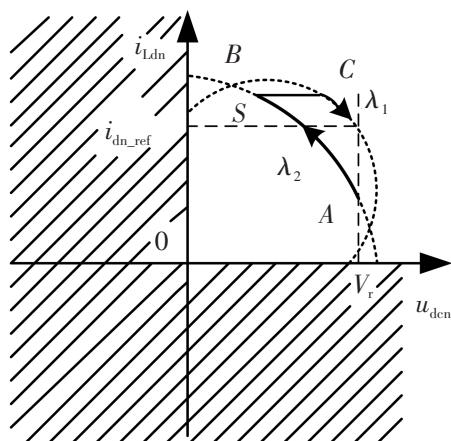


图5 电流限幅下的自然轨迹图
Fig. 5 NSS under current limiting

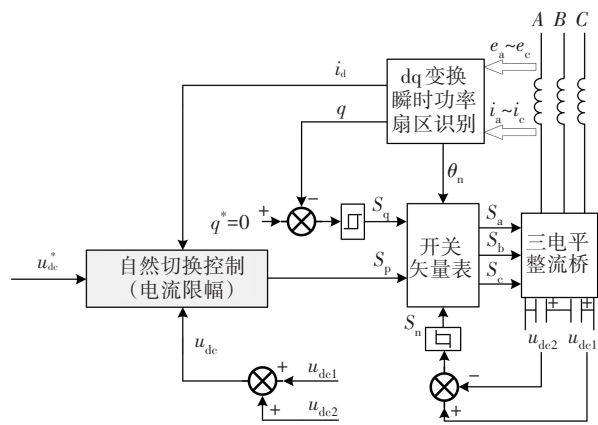


图6 自然切换控制框图
Fig.6 Natural switching control block diagram

如图5负载突增电流限幅图所示,在 λ_2 轨迹上,此时 $u_{dcn} < 1$,图中S点为电流运行的限幅点,电流小于该限幅值 I_{th} 时,按照原控制率运行;电流超过该限幅值时,强制改变控制率,使得 $S_p=0$,选择相应的控制矢量,使得系统运行在第三轨迹上,抑制电流继续增大;直至运行至 λ_1 轨迹,重新按照所述控制率运行至稳态点,实现电流限幅控制.

即此时有第三轨迹 σ_3 表达式:

$$\sigma_3 = i_d - I_{th} \quad (19)$$

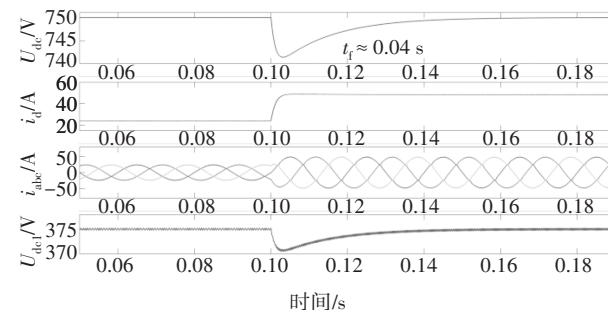
在此轨迹上控制律修改为(其余开关表选择信号控制律不变):

$$\text{当 } \sigma_3 > 0, S_p = 0, \text{ 否则 } S_p = 1.$$

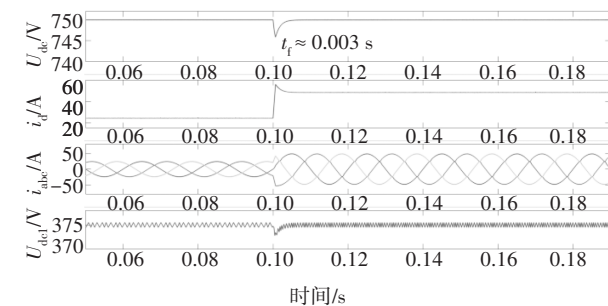
图6为依照限幅控制的自然切换控制原理图,与传统DPC控制不同的是,无需外环电压控制,且通过自然切换控制来实现开关矢量选择信号.

5 仿真实证

根据上文所述,对T型三电平传统DPC控制与自然切换控制法分别进行了仿真实验.根据文献[2]中对直流母线电压、交流侧电感及直流侧电容等约束条件,仿真取电网侧三相交流电压380V,给定参考直流母线电压750V, $R_s = 0.005 \Omega$, $L_s = 2.2 \text{ mH}$, 电容值为 $C_1 = C_2 = 400 \mu\text{F}$.初始时刻直流侧电阻为 50Ω ,在0.1s时突变为 25Ω .仿真在Matlab/Simulink2019a的环境下进行,得到仿真波形图如图7至图9所示, t_f 为响应时间.



(a)传统DPC方法 $u_{dc}, i_d, i_a-i_c, u_{dc1}$ 波形图

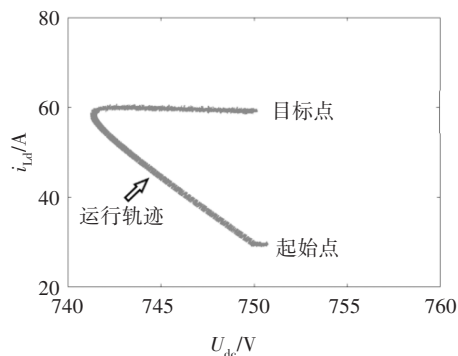


(b)NSS方法 $u_{dc}, i_d, i_a-i_c, u_{dc1}$ 波形图

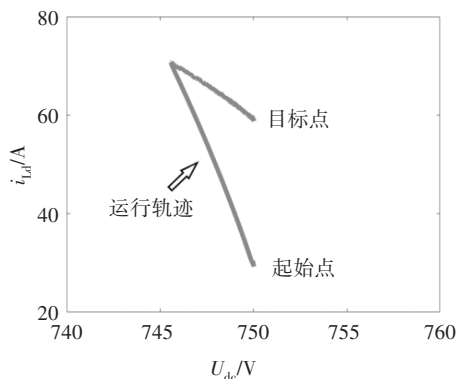
图7 仿真结果

Fig. 7 Simulation results

如果电流采取限幅输出,对电流 i_d 限幅50A,对应有 $i_{Ld} = \sqrt{3/2} i_d$.在0.1s投入扰动负荷后,得到限幅输出波形及自然轨迹图如图9所示.



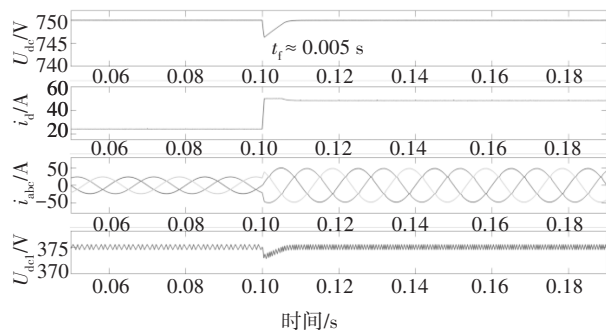
(a)传统DPC方法负载突变自然轨迹图



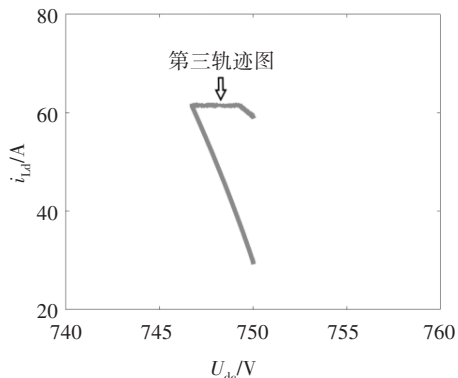
(b)NSS方法负载突变自然轨迹图

图8 轨迹图

Fig. 8 Trajectories



(a)限幅下的NSS波形图



(b)电流限幅下的自然轨迹图

图9 电流限幅的NSS方法的仿真结果

Fig.9 Simulation results of NSS methods under current limiting

图7和图8为传统DPC控制方法和NSS控制方法下的仿真结果及轨迹图.图7(a)(b)波形图从上到下依次为:直流侧电压,d轴电流,交流侧三相电流,电容 C_1 电压.可以看出,在负载突变后,相较于传统方法,NSS方法下电压电流响应速度大幅提升,由0.05 s提升至0.003 s左右;且直流侧电压降落更小,由8 V降低至4 V.图8(a)(b)为两种方法下的自然轨迹图,可清晰看出,NSS方法下的系统动态响应过程更好,直流侧电压波动更小.同时,根据图9可看出,针对电流超调严重的情况,应用文中提出的限幅方法后,电流 i_d 被限幅控制,超调下降,动态响应时间变为0.005 s,略有变长,但响应过程平滑,与理论分析一致,系统运行经过第三轨迹,验证了电流限幅控制的有效性.

6 结语

文中提出了一种T型三电平整流器的自然切换及其电流峰值控制策略,相对传统直接功率控制,该方法无需电压外环控制,可以有效提高系统的动态响应性能,输出电压和电流响应均比传统控制方法效果理想.针对电流超调现象严重的情况,文中对切换控制律进行限幅修正,提出第三轨迹运行方案,通过仿真验证,对切换控制律修正的限幅方法有效实现了电流峰值控制,输出波形效果更为平滑.

参考文献

- [1] 张颖超,赵争鸣,袁立强,等. 三电平PWM整流器直接功率控制[J]. 电工技术学报,2008,23(5):62-68.
ZHANG Y C,ZHAO Z M,YUAN L Q, *et al.* Direct power control for three-level PWM rectifier[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2008,23(5):62-68. (In Chinese)
- [2] 沈凤龙,满永奎,王建辉,等. 基于直接功率控制的三电平PWM整流器设计[J]. 电力电子技术,2019,53(2):112-115.
SHEN F L,MAN Y K,WANG J H, *et al.* Design and implementation based on direct power control for a three-level PWM rectifier[J]. Power Electronics,2019,53(2):112-115. (In Chinese)
- [3] 周石强. T型三电平逆变器控制策略的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
ZHOU S Q. Research on the control strategy of T-type three-level inverter[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2019. (In Chinese)
- [4] ZHOU J Y,OJO J O,TANG F, *et al.* A carrier-based discontinuous PWM for single and parallel three-level T-type converters with neutral-point potential balancing[J]. IEEE Transactions on

- Industry Applications, 2021, 57(5): 5117-5127.
- [5] ZHAO R D, WANG C, LOH P C, *et al.* A practical core loss estimation method for three-phase three-level grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2263-2267.
- [6] 赵新宽, 陈燕东. 三电平整流器动态加权最优开关矢量MPC设计[J]. 电力电子技术, 2021, 55(1): 116-120.
ZHAO X K, CHEN Y D. Design of dynamic weighted optimal switching vector MPC for three-level rectifier[J]. Power Electronics, 2021, 55(1): 116-120. (In Chinese)
- [7] 王伟伟, 张辉, 张伟亮. 基于模型预测的T型并网变换器功率控制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(1): 10-13.
WANG H W, ZHANG H, ZHANG W L. Power control for a T-type grid-connected converter based on the model prediction[J]. Power Electronics, 2020, 54(1): 10-13. (In Chinese)
- [8] 钟炎平, 沈颂华. PWM整流器的一种快速电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 52-56.
ZHONG Y P, SHEN S H. A fast current control scheme for pwm rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 52-56. (In Chinese)
- [9] GALVEZ J M, ORDONEZ M, LUCHINO F, *et al.* Improvements in boundary control of boost converters using the natural switching surface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3367-3376.
- [10] GALVEZ J M, ORDONEZ M. Boundary control of boost-derived PFCs using the Natural Switching Surface: Derivation and enhanced properties [C]//2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA; IEEE, 2011: 2597-2602.
- [11] GALVEZ J M, ORDONEZ M. Introducing the Natural Switching Surface for reference frame systems: Three-phase boost PFCs [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA; IEEE, 2012: 1064-1070.
- [12] GE J J, ZHAO Z M, YUAN L Q, *et al.* Direct power control based on natural switching surface for three-phase PWM rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 2918-2922.
- [13] 张国胜, 胡海兵, 夏玉政, 等. 一种简易的三电平APF中点电位控制方法[J]. 电力电子技术, 2021, 55(6): 122-124.
ZHANG G S, HU H B, XIA Y Z, *et al.* A simple three-level APF neutral potential control method[J]. Power Electronics, 2021, 55(6): 122-124. (In Chinese)
- [14] 聂金铜, 赵争鸣, 袁立强, 等. 级联恒功率负载情况下三相并网PWM整流器基于TS模糊模型的稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1931-1943.
NIE J T, ZHAO Z M, YUAN L Q, *et al.* Stability of three-phase grid-connected PWM rectifier cascaded with constant power loads based on TS fuzzy models[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1931-1943. (In Chinese)
- [15] 宋文胜, 冯晓云, 蒋威. 一种单相三电平中点钳位整流器的SVPWM控制方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 69-73.
SONG W S, FENG X Y, JIANG W. A SVPWM method for single phase three-level NPC voltage-source rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 69-73. (In Chinese)
- [16] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
WANG Z A, LIU J J. Power electronics[M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (In Chinese)
- [17] 吴杰伟. T型三电平储能功率变流器装置研制[D]. 北京: 北方工业大学, 2020.
WU J W. Development of T-type three-level energy storage power converter system[D]. Beijing: North China University of Technology, 2020. (In Chinese)
- [18] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
HUANG J, WANG Z A. Power electronic converter technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1993. (In Chinese)
- [19] 黄竞智, 吴雷, 沈佳焯. NPC型三电平逆变器的中点电位控制方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 40-44.
HUANG J Z, WU L, SHEN J Y. Research on control method of NPC three-level inverter neutral voltage balance[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(3): 40-44. (In Chinese)
- [20] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
XU D H. Power electronic system modeling and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (In Chinese)