

基于空间序列调制的电压均衡策略研究

李行 彭旭

中国民用航空飞行学院 四川 成都 610000

摘要: 在电力电子变压器 (Power Electronic Transformer, PET) 系统中, 三电平中点钳位级联整流器 (Three-Level Neutral Point Clamped Cascaded Rectifier, 3LNPC-CR) 是实现电能变换的重要组成部分, 其直流链路电压的稳定程度直接关系到系统的运行可靠性^[1-2]。针对同一相内多个子模块直流链路电压不平衡问题, 本文提出一种基于空间序列调制 (Space Sequence Modulation, SSM) 的控制方法, 并结合不平衡电流注入控制 (Unbalanced Current Injection Control, UCIC) 和双闭环控制策略。

关键词: 三电平中点钳位级联整流器; 电力电子变压器; 不平衡电流注入; 电压均衡

引言: 随着电力电子技术的快速发展, 多电平电力变换器在新能源发电、电力电子变压器以及轨道交通供电等领域得到了广泛应用^[3]。近年来, 多电平电力电子变换器由于具有输出电压质量高、器件电压应力低以及系统效率高优点, 在电力电子变压器、牵引供电系统以及静止无功补偿装置 (STATCOM) 等领域得到了广泛应用^[4]。

1 基本控制策略和调制策略

1.1 控制策略

本文的控制策略采用双闭环控制策略和UCIC策略相结合的方法。双闭环控制策略, 其主要作用是稳定直流侧电压并实现单位功率因数控制。UCIC 策略通过根据负载不平衡程度向系统注入适当的电流, 从而实现功率调节与电压均衡。

1.2 空间序列调制策略

本文提出了一种以实现电压均衡为目标的空间序列调制 (Space Sequence Modulation, SSM) 策略。该策略通过合理选择各子模块的开关状态, 对直流链路电压进行动态调节。根据公式 (1) - (3)、表1, 可以计算得到对应的序列号。

$$a_i = X_{i1} + X_{i2} + X_{i3}, \quad (1)$$

$$b_i = X_{i1}^2 + X_{i2}^2 + X_{i3}^2, \quad (2)$$

$$c_i = \text{rank}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}), \quad (3)$$

表1 直流电压等级

等级(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3})	直流侧电压
1	$V_{dc1} > V_{dc2} > V_{dc3}$
2	$V_{dc1} > V_{dc3} > V_{dc2}$
3	$V_{dc2} > V_{dc1} > V_{dc3}$
4	$V_{dc2} > V_{dc3} > V_{dc1}$
5	$V_{dc3} > V_{dc1} > V_{dc2}$
6	$V_{dc3} > V_{dc2} > V_{dc1}$

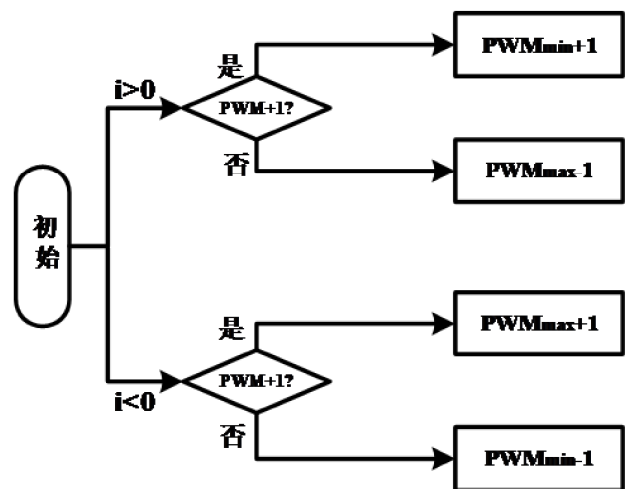


图1 SSM策略下三模块3LNPC-CR模块电压调整规律

图1展示了在 SSM 策略作用下, 三相三模块 3LNPC-CR 系统中各模块的电压调节规则。其中, PWM_{min} 表示直流电压最低模块的开关状态, 且满足 $PWM_{min} \neq -$; PWM_{max} 表示直流电压最高模块的开关状态, 并满足 $PWM_{max} \neq 2$ 。

通过公式 (1) - (3) 以及模块初始状态(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}), 可以计算得到对应的序列号 (a_i, b_i, c_i)。同理, 根据调整后的模块状态 ($X_{i+1,1}, X_{i+1,2}, X_{i+1,3}$), 可以进一步计算新的序列号 ($a_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}$), 并将其存储在对应 (a_i, b_i, c_i) 的地址位置。通过这种方式, 可以将所有开关状态组织为一个查找表, 从而在实际控制过程中快速获取调整后的模块状态。

2 仿真与实验

为了验证所提出控制策略的有效性, 本研究在 Matlab/Simulink 平台上建立三相三模块 3LNPC-CR 仿真模型, 并进行负载突变实验。

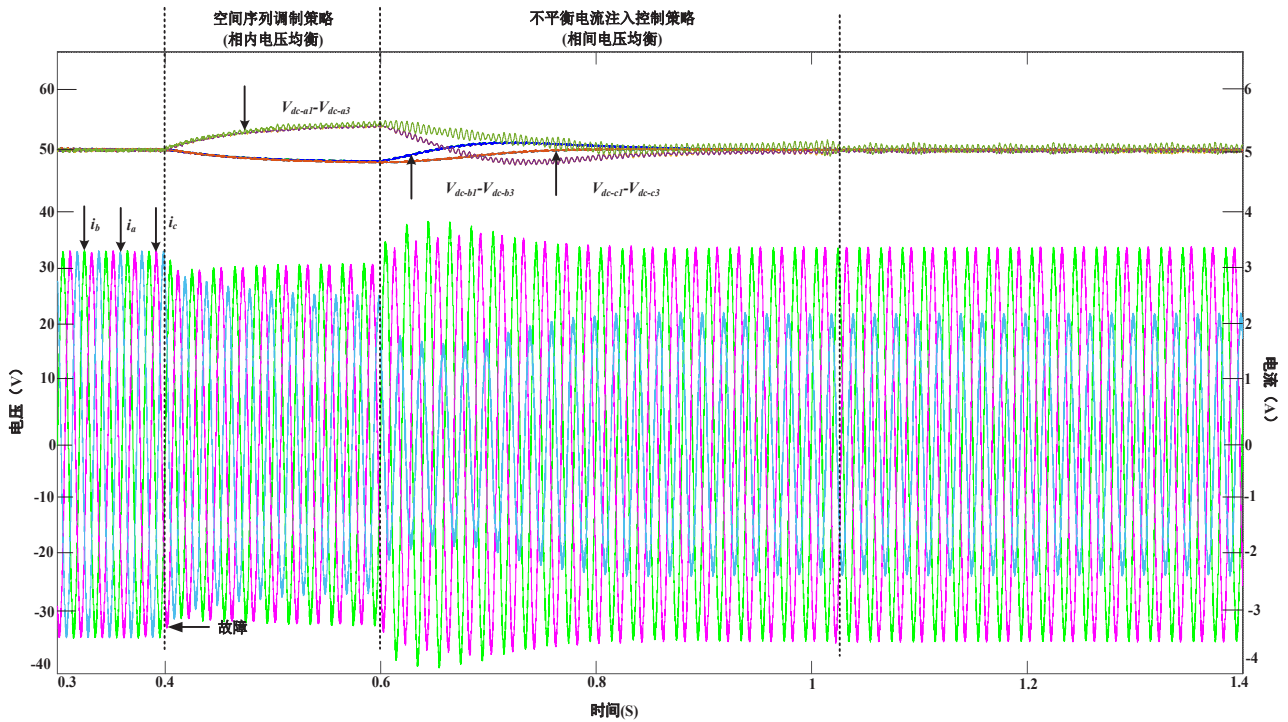


图2 三相三模块 3LNPC-CR 的直流侧电压与输入电流

图2展示了SSM与UCIC策略联合控制下，当A相第一个模块负载被移除时三相电压与电流的动态变化过程。当在0.4s时引入SSM策略后，B相和C相三个模块的直流母线电压逐渐下降至约48V，而A相模块电压则上升至约55V。在0.4s至0.6s的时间区间内，相内各模块电压逐渐达到平衡。同时，三相输入电流均出现下降，其中A相电流下降幅度更为明显，约降低至初始值的四分之三。在0.6s时，进一步启用UCIC控制策略。此后，A相三个模块的直流侧电压开始逐渐下降，而B相与C相的

电压则相应上升。到1s时，三相直流侧电压均稳定在约50V，实现了相间电压的均衡。在此过程中，A相输入电流较初始值下降约三分之一，而B相和C相的电流基本恢复至原始水平。

仿真结果表明，所提出的电压均衡控制策略能够实现三相直流电压的快速平衡，验证了该方法的有效性以及良好的动态响应性能。然而，在电压均衡实现的同时，三相输入电流之间仍存在一定程度的轻微不平衡。

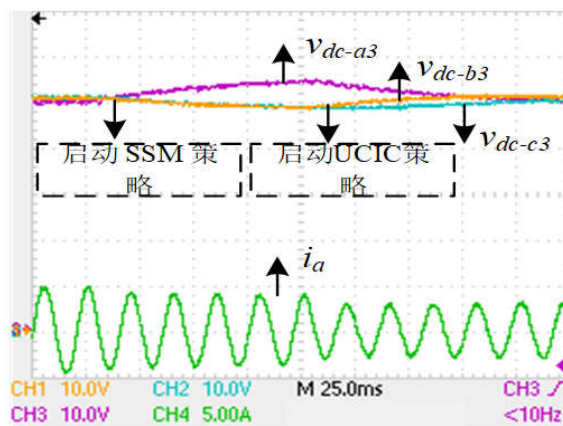


图3 负载移除后，SSM与UCIC策略作用下三模块3LNPC-CR的实验波形：三相第三子模块的直流链路电

压及A相输入电流 此外，进一步搭建了实验平台进行验证。从图3可以

看出,在仅采用SSM策略进行调节时,A相第三模块的直流母线电压逐渐上升,并最终达到约56V,

当进一步引入UCIC控制策略后,系统通过向三相输入电流中注入适当的负序电流,对各相输入功率进行重新分配。随着UCIC策略的作用,A相模块的直流母线电压逐渐下降并稳定在约50V,而B相和C相的直流母线电压则逐渐上升,并最终恢复至约50V。经过这一调节过程,三相直流母线电压重新达到一致,实现了相间电压的均衡。

由此可以看出,SSM策略主要用于实现相内模块电压的快速调节,而UCIC策略则能够进一步实现三相之间的功率再分配,从而消除相间电压不平衡

3 结语

本文针对三相3LNPC级联整流器直流链路电压不平衡问题,提出了一种基于空间序列调制与不平衡电流注入控制相结合的电压均衡策略。研究表明:

(1)所提出的控制策略能够保证三相NPC级联整流器系统稳定运行;

(2)空间序列调制策略能够快速实现相内子模块电压均衡;

参考文献

[1]何晋伟,孟维奇,蒋玮,等.新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J].高电压技术,2023,49(07):2983-2994.

[2]田亚卓,张勇军,肖雄,等.一种三电平NPC整流-逆变调速系统的无权重系数模型预测控制策略[J].工程科学学报,2024,46(12):2257-2268.

[3]赵伟,袁至,王维庆,等.基于附加电平MPC的MMC环流抑制与子模块双重均压控制[J].智慧电力,2022,50(03):57-64.

[4]朱皓天,刘思阳,李旭东,等.级联整流相内-相间直流电压均衡控制策略[J].高电压技术,2023,49(12):5151-5160.