

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.003

基于电压重注式 STATCOM 的控制策略研究

张志艳¹, 陈更¹, 杨朋威¹, 陈肖璐¹, 罗振鹏²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特 010080)

摘要: 随着电力电子器件的制造水平不断提升和人们对电能质量要求越来越高, 基于电压重注式变换器的静止同步补偿器(STATCOM)动态响应速度快, 不需要滤波装置且输出电压谐波含量较低, 并且适用于高压大功率的输电系统。直流电压重注式 STATCOM 的主电路重注拓扑结构由两个三相全桥串联和附加的重注支路构成, 重注支路采用级联 H 桥结构。重注电压产生过零区间能够实现三相全桥开关零电压通断, 设计了重注支路脉冲序列构成方法并提出改进循环逻辑触发时序, 仿真表明重注支路在特定的循环触发脉冲作用下可以有效抑制重注式级联 H 桥中电容电压不平衡。利用仿真平台验证了该变换器在过零关断、消除谐波等工作特性方面的优点。把无功电流作为直接的控制命令, 建立闭环控制系统, 验证该 STATCOM 在高压大功率系统中能够有效降低谐波含量和开关频率, 提高装置和系统的运行可靠性, 特别适用于高压大功率环境。

关键词: 无功补偿; STATCOM; 电压源型变换器; 电压重注; 高压大容量

Study on Control Strategy Based on Voltage Re-injection STATCOM

ZHANG Zhiyan¹, CHEN Gen¹, YANG Pengwei¹, CHEN Xiaolu¹, LUO Zhenpeng²

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute,

Hohhot 010020, China; 2. Electric Power Institute, Inner Mongolia University of Technology,

Hohhot 010080, China)

Abstract: With the continuous improvement of the manufacturing level of power electronic elements and the increasing demand of power quality by the people, the static synchronous compensator (STATCOM) based on the voltage re-injection converter has a fast dynamic response speed, does not require filtering devices and outputs low voltage harmonic contents and is suitable for high-voltage and high-power transmission systems. The main circuit re-injection topological structure of the DC voltage re-injection type STATCOM consists of two three-phase full bridges in series and an additional re-injection branch, and the re-injection branch adopts a cascaded H-bridge structure. The zero-crossing interval generated by the re-injection voltage can achieve the zero-voltage on-off of the three-phase full-bridge switch. The construction method of the re-injection branch pulse sequence is designed and an improved cycle logic trigger sequence is proposed. The simulation shows that the re-injection branch can effectively suppress the capacitor voltage unbalance in the re-injection cascaded H-bridge under the specific cyclic trigger pulse. The advantages of the converter in terms of zero-crossing turn-off and harmonic elimination are verified by the simulation platform. The reactive current is taken as a direct control command, a closed-loop control system is set up to verify that the STATCOM can effectively reduce the harmonic content and switching frequency in high-voltage and high-power systems, improve the operation reliability of devices and systems, and is especially suitable for high-voltage and high-power environments.

Keywords: reactive power compensation; STATCOM; voltage source converter; voltage re-injection; high voltage and large capacity

0 引言

目前,无功功率补偿主要有并联电容器、机械旋转类、静止无功补偿器和静止同步无功补偿器4种补偿方式。并联电容器结构简单方便且成本低,但补偿精度低实时性弱,补偿效果不平滑,所以常被用来作为复合补偿结构的组成部分^[1]。机械旋转类补偿装置维护费用较高,相比于其他补偿装置体积大且噪声大,所以现在大部分无功补偿器都采用静止类补偿装置^[2]。静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)在运行范围、损耗、调节速度等方面都有一定优势,其在提高电力系统输电性能和电能质量方面不可替代^[3-5]。随着电力负荷和输电容量的不断增加,STATCOM也在向高压大容量方向发展。

多电平 STATCOM 常用的拓扑结构有飞跨电容箝位型、级联 H 桥型^[6]、二极管箝位型和模块化 MMC 结构,控制策略比较复杂^[7-10]。其中,飞跨电容箝位型和二极管箝位型结构需要大量的箝位元件,控制难度大;级联 H 桥型拓扑结构简单,常在高压电力系统中应用,但需要设计合适的控制器来解决电容电压的不平衡问题;模块化 MMC 结构应用于高电压等级时需要串入电抗器来抑制各桥臂环流^[11],装置成本较高。

在上世纪七十年代,有学者提出一种新的谐波消除理论,其核心思想就是在直流侧附加重注纹波^[12]。有多级重注式电流源型变换器和电压源型变换器两种拓扑类型,多级重注式结构包含了软开关、多级变换以及零电压开关理论。本文根据近年来重注式变换器的主要研究成果,如文献[13-14]提出重注式变换

器结构,通过在变换器两桥间重新注入多电平电压,实现多级输出电压波形,箝位开关的数量大大减少。文献[15-16]提出了一种多电平大功率注入式电流源型变换器,详细介绍其拓扑结构的工作原理。在此基础上文献[17-18]研究开关逻辑触发时序,由系统的数学模型设计 PI 控制器跟踪负载功率进行无功补偿,文献[19-20]深入研究了多电流叠加方式的 STATCOM 工作原理和检测方法,建立电流闭环直接控制系统。相较于电流源型系统,电压源型系统研究较少,本文研究电压源型系统。设计主桥与重注级联 H 桥的触发时序,使主桥开关实现零电压换相,提出重注支路脉冲的构成方法和循环触发逻辑时序,解决重注变换器中电容电压的不平衡问题,研究电压重注式变换器 STATCOM 的控制系统,最后在仿真软件中验证系统控制策略的稳态特性。

1 重注拓扑工作原理分析

传统 12 脉波变换器拓扑结构主要由变压器和两个全控桥组成。重注式变换器拓扑结构见图 1,变压器采用 Y/d-1 接法,左桥连接变压器二次侧绕组采用星形联结,右桥连接变压器二次侧绕组采用三角形联结,使变压器二次侧输出两组存在相位差的三相电压。

图中接于右桥电压的相位滞后左桥电压 30° ,当变换器正常运行时,保持两个三相全控桥接入的线电压幅值相同,所以右桥连接变压器二次侧绕组相电压是左桥连接变压器二次侧绕组相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,变压器二次侧分别连接相互串联的两个三相全控桥。电压重注式变换器在两个全控桥与直流侧

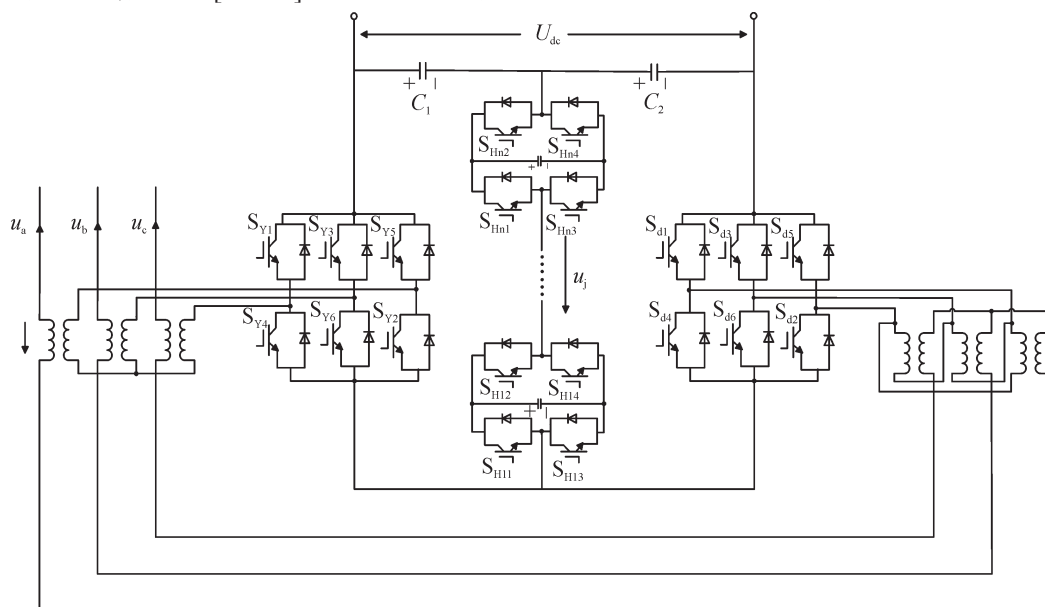


图 1 电压重注式变换器拓扑图
Fig. 1 Topological diagram of voltage re-injection converter

之间重新注入一个多电平周期变化的电压。重注支路采用级联 H 桥串联的联结方式,所有器件均采用 IGBT。图 1 中: U_a 、 U_b 、 U_c 为交流侧电网电压; U_{dc} 为直流测电压; U_{YY} 、 U_{Yd} 分别为两组三相全控桥输出电压; U_j 为重注支路的输出电压; C_1 和 C_2 为直流侧电容; S 为开关器件。

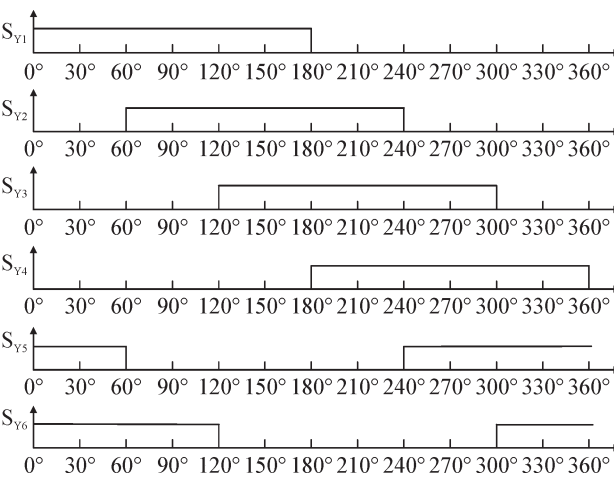
如图 1 所示,该电压重注式变换器与交流系统同步连接,可以整流逆变双向运行。重注变换器两个主桥均采用 180°导电方式,即两个三相全控桥的导电角度是 180°,并且右面的三相全控桥滞后于左面的 30°,当初始角为 0°时,图 2 给出两个三相全控桥器件工作模式。

图 2 中 YY 接三相全控桥按相位依次差 60°的顺序触发 6 个开关管,Yd 接三相全控桥各个开关器件分别滞后于 YY 接三相全控桥开关管 30°。

重注支路采用级联 H 桥结构,对角导通输出正负电平,平行导通输出零电平,通过控制 H 桥各单位使其输出 U_1-U_9 的阶梯波多电平电压。由重注式变换器工作原理得出公式

$$U_j + U_{dc1} = U_{YY}$$

(1)



$$U_{dc2} - U_j = U_{Yd}$$

(2)

式中, U_{dc1} 、 U_{dc2} 分别代表直流侧电容电压。

电压重注概念是建立在合适的注入电压的基础上,由公式(1)和(2)可知重注电压与直流侧电压合成到主控桥,只要改变重注支路输出电压的大小和方向即可改变全控桥上的电压。

以半个周期为例,主控桥的逻辑触发时序以及对应的重注支路输出电压见表 1-2。

表 1 中 S_{YY} 代表 YY 接全控桥上开关器件; S_{Yd} 代表 Yd 接全控桥上开关器件;表 2 中 YY 桥换相器件代表 YY 接全控桥上器件在对应角度换相;Yd 桥换相器件代表 Yd 接全控桥上器件在对应角度上换相。为了配合两个三相全控桥,重注支路输出的是一个先上升下降的 6 倍基频多级电压,从表中可以看出 YY 接全控桥在 0°、60°、120°和 180°时换相,Yd 接全控桥在 30°、90°、150°时换相,重注电路产生 U_9 和 U_1 的重注电压,在此时刻将分别为 YY 接和 Yd 接主桥提供零电压,实现开关器件在零电压下通断,两个三相全控桥每个桥臂上所串联的器件无动态均压问题,可提高其工作可靠性。

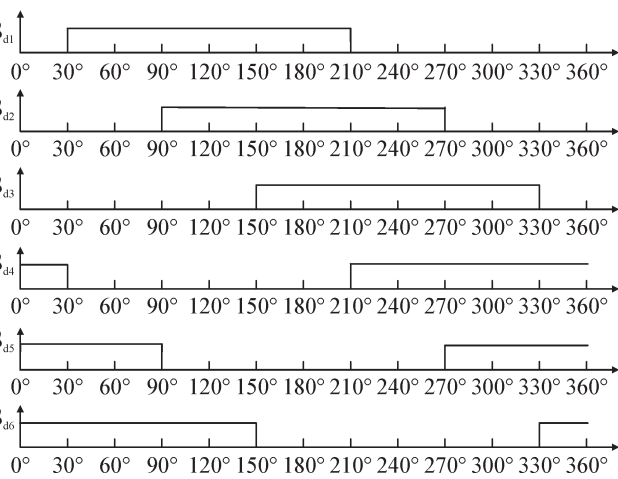


图2 主桥器件工作模式

Fig. 2 Operation mode of main bridge element

表 1 主控桥开关工作状态

Table 1 Operation status of main control bridge switch

角度	0°- 30°	30°- 60°	60°- 90°	90°- 120°	120°- 150°	150°- 180°
S_{YY}	5, 6, 1	5, 6, 1	6, 1, 2	6, 1, 2	1, 2, 3	1, 2, 3
S_{Yd}	4, 5, 6	5, 6, 1	5, 6, 1	6, 1, 2	6, 1, 2	1, 2, 3

表 2 主控桥开关换相对应注入桥输出电平

Table 2 Commutation of the main control bridge switch to the corresponding injection bridge output level

角度	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
YY 桥换相器件	4→1	—	5→2	—	6→3	—	1→4
Yd 桥换相器件	—	4→1	—	5→2	—	6→3	—
重注支路输出电压	U_9	U_1	U_9	U_1	U_9	U_1	U_9

2 电压重注支路脉冲时序

2.1 重注支路脉冲构成方法

以九电平为例对重注支路触发脉冲构成方法的具体步骤进行推理,在此基础上可推广到 m 重注电平的基本方法。

第1步:由于重注支路输出的电压波形是4个重注级联H桥单元输出电压叠加而成,重注支路输出九电平电压见图3,根据级联H桥单元工作原理将一个周期 60° 内的九阶梯电压波形进行分解研究,可得到如图3所示的8个电平组合模块,令其中前 30° 分解为前4组重注正电平单元 $U_1^+ - U_4^+$,后 30° 分解为后4组重注负电平单元 $U_1^- - U_4^-$,则整个周期的重注支路输出电压为 $U_1^+ - U_4^+$ 和 $U_1^- - U_4^-$ 的组

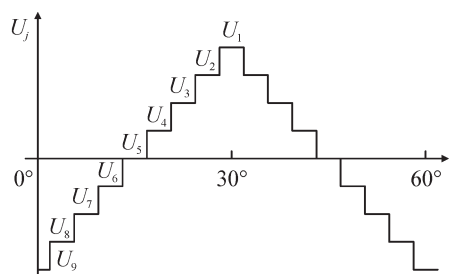


图3 重注支路电压和组合单元
Fig. 3 Re-injection branch voltage and combination unit

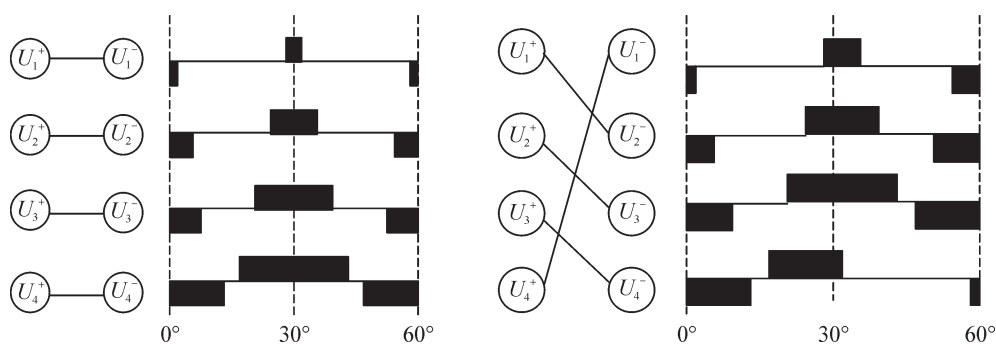


图4 基本单元代表
Fig. 4 Basic unit representation

第3步:为了保证重注支路中各电容电压均衡,必须保证各重注支路与直流测电压在一定时间内的积分值相等,由公式(1)和(2)可知,重注支路输出电压与两组三相全控桥输出电压 U_{YY} 和 U_{Yd} 有关,由于 U_{YY} 和 U_{Yd} 均以 60° 为周期变化的电压波形,在不同的电平单元组合作用下的重注支路各桥电压分布均不同。为了保证重注支路在一定周期内平均值相等,必须保证重注支路输出电压在一定时间内包含各基本电平单元。现在以九电平为例分析,一组电平单元包含8个基本组合单元,遍

合排列,不同的组合方式在满足基本条件的前提下构成不同的重注支路输出电平组合方案。由此可以推出 m 组电平重注支路时,同理可将等增量阶梯波分解为正负各 $(m-1)/2$ 组重注支路组合单元。

第2步:从重注支路的4组正电平单元 $U_1^+ - U_4^+$ 和4组负电平单元 $U_1^- - U_4^-$ 分别各选其一,进行两两组合,构成 60° 宽的4组基本电平组合单元,不同的组合方式将构成不同的重注级联H桥单元输出电平时序,可推出九电平重注支路有若干种组合方式,图4取其中两种不同的组合单元为例进行推理研究。根据组合原理可推出共有 $4!$ 种重注级联H桥输出电平的组合方法,所以当 m 电平重注时,共有 $((m-1)/2)!$ 种不同电平的基本组合单元。

历共需要 $8 \times 30^\circ = 240^\circ$,因此可以确定重注支路触发脉冲的工作周期必须为 240° 的整数倍,最小触发脉冲周期为 240° 。当推广到采用 m 电平重注时,重注支路触发脉冲周期必须为 $(m-1) \times 30^\circ$ 的整数倍。

第4步:确定了重注支路的输出电压波形的逻辑时序,根据前面介绍的配合原理,4个级联H桥单元根据选定对应的输出电平组合,设计4个开关器件的导通时序,按照前面的组合规律配合好即可。

通过以上4步就可以构造出不同脉冲序列、不

同周期且可行的九电平重注支路触发脉冲方案。

2.2 循环触发对电容电压不平衡的抑制作用

4个重注单元在总的输出电压之和不变的前提下,每个重注单元级联H桥的输出电压是循环变化的,也就是每个级联H桥的开关器件的开通时序是循环变化的就称为循环触发方式。若每个开关器件的导通宽度是不变的称为非循环触发方式。

分别采用两种触发方式,触发脉冲的设计分析过程见图5-6。

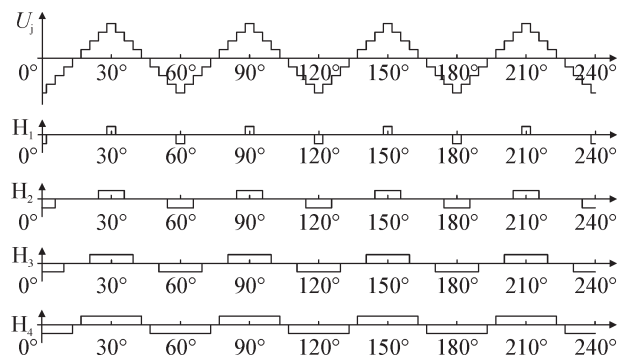


图5 非循环重注支路叠加电压
Fig. 5 Superimposed voltage of acyclic re-injection branch

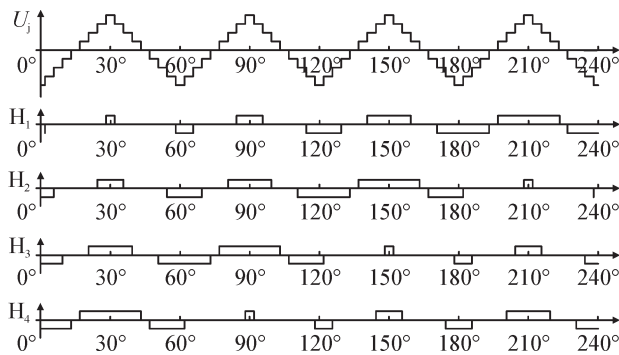


图6 循环重注支路叠加电压
Fig. 6 Superimposed voltage of cyclic re-injection branch

图6可以看成以一个周期 60° 为单元依次循环图5的非循环组合方式,4个周期完成一轮循环。根据这种循环的组合方式确定循环触发脉冲方案设计控制4个级联H桥中器件的导通与关断时间。

3 电压重注式STATCOM控制策略

电压重注式变换器不使用PWM调制技术,重注支路的触发脉冲时序确定以后,其控制变量就只剩系统中变换器的触发角,触发角对应变换器触发脉冲。由于唯一的控制量触发角与无功功率呈现出单向近似线性关系的特点,控制器的设计可选择PI控制器。选用负载侧的无功功率为给定值,得到

控制指令电流,最终通过电流跟踪控制触发角来产生触发脉冲实现无功调节,电压重注式STATCOM的系统控制策略见图7。

以STATCOM交流侧无功电流作为闭环控制系统的直接控制指令,确保了电压重注式STATCOM的直接电流控制。电压重注式STATCOM的触发脉冲与交流电网电压信号同步,从而保证了电压重注式STATCOM中重注变换器的阶梯电压与交流电压同步。利用PI无差控制器产生重注变换器所需要的相角控制指令,从而实现对交流侧输出电压的控制,最终得到系统所需的无功功率值。

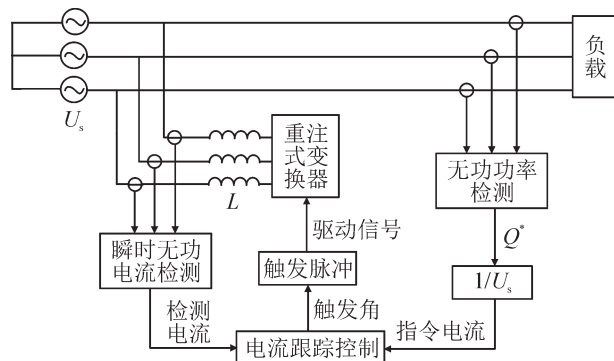


图7 重注式STATCOM系统整体控制图
Fig. 7 Overall control diagram of re-injection STATCOM system

4 仿真实验分析

本文仿真基于Matlab软件,在Simulink环境下搭建电压重注式STATCOM系统。

4.1 过零关断仿真分析

根据电压重注式变换器的基础理论分析,研究九电平重注式变换器拓扑结构的过零关断特性,搭建重注变换器仿真模型进行分析验证,仿真结果见图8。

由图8可以看出在一个周期内,YY接三相全控桥在 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$,Yd接三相全控桥在 $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$ 时为零电压时刻,此时主控桥开关器件通断,可实现零电压开关,两个三相全控桥每个桥臂上所串联的器件无动态均压问题,可提高其工作可靠性。

通过对图8中的电压波形进行分析,在0.18~0.2s能够了解到重注支路输出周期变化的九电平阶梯电压波形。当重注支路输出电压为 $-U_j$ 峰值时,变换器主桥 U_{YY} 电压为零,为YY接全控桥换相提供了零电压关断条件;当重注支路输出电压为 $+U_j$ 峰值时,变换器主桥 U_{Yd} 电压为零,保证了重注变换器中Yd接全控桥所需的零电压条件。所以,

重注桥中通过特定的开关时序,能够保证主桥开关器件零电压运行条件。在大功率变换器中能够实现自由控制开关器件的工作特性,而且在 0.02 s 一个周期内,变换器的主桥 YY 接全控桥和 Yd 接全控桥均能够产生 6 个电压过零点,能够保证主桥开关器件零电压稳定换相与高效工作。

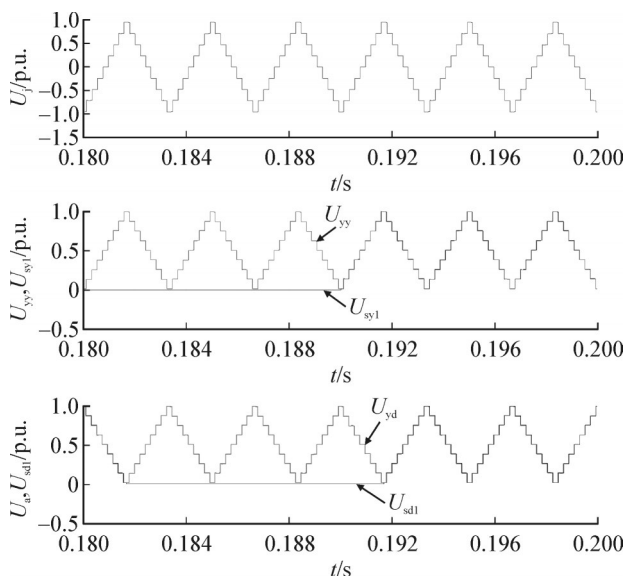


图8 重注支路与主桥输出电压
Fig. 8 Re-injection branch and main bridge output voltage

变压器二次侧输出电压见图9。图9中变压器YY接二次侧输出交流a相电压 U_{Ya} ,其导通宽度为 180° 。变压器Yd接二次侧输出交流a相电压 U_{da} ,其导通宽度为 120° 。

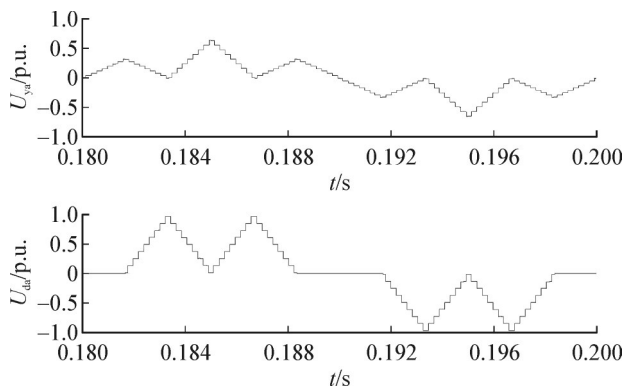


图9 变压器二次侧输出电压
Fig. 9 Secondary side output voltage of transformer

图10是变换器交流侧输出a相电压,他由 U_{Ya} 和 U_{da} 通过变压器耦合而成。对重注变换器交流侧a相输出电压进行FFT分析,此时THD为2.19%,满足目前电网谐波标准的要求,说明了当重注变换器交流侧没有装设滤波器的条件下能提高变换器输出电压电能质量,降低了装置成本。

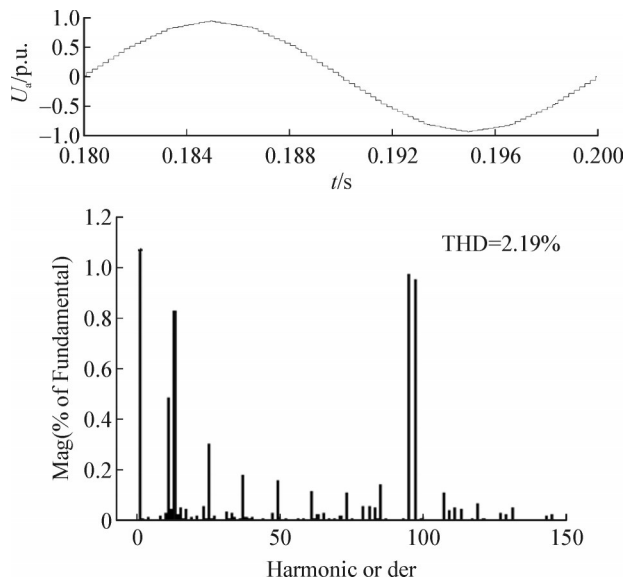


图10 重注变换器交流侧a相输出电压
Fig. 10 The output voltage of phase a at AC side of the re-inject converter

4.2 循环触发脉冲仿真分析

仿真时间0.2 s,取0.18~0.2 s一个周期放大分析,图11是重注支路无循环触发的4个H桥电容电压图,重注支路 H_1 桥单元中电容的输出电压较低, H_4 桥单元中电容的输出电压较高,4个桥单元的电容电压明显不平衡。图12是加入循环逻辑触发时序的电容电压图,经过几个周期仿真取平均值分析,4个桥单元中的电容电压基本一致,可以发现循环逻辑触发时序可以有效抑制重注桥中电容电压不平衡。

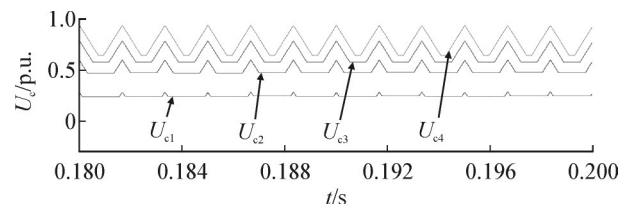


图11 无循环4个H桥中电容电压
Fig. 11 Capacitive voltage in four H-bridges without cycles

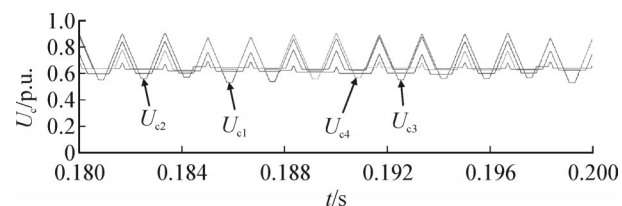


图12 循环4个H桥中电容电压
Fig. 12 Capacitive voltage in in four H-bridges with cycles

4.3 控制策略仿真分析

根据图7的控制策略,电压重注式STATCOM系统的仿真电压等级110 kV,直流侧电容2 500 μ F,重注支路电容0.01 F,连接电感1 mH,系统补偿无功170 Mvar。

在 STATCOM 容性工况向感性工况切换仿真。图 13(a)是电网工作在感性负载与容性负载切换时,在 0~0.04 s 电网带感性负载工作,电网电流滞后电压 90° ,未并入电压重注式 STATCOM,此时电网补偿系统所需的无功功率。在 0.04 s 以后并入电压重注式 STATCOM 来补偿负载所需无功,大约一个周期以后负载所需的无功功率全部由 STATCOM 无功补偿装置提供。在 0.14 s 时负载侧由感性负载切换到容性负载,电压重注式 STATCOM 也能很快的吸收系统中无功功率。STATCOM 补偿以后的电压电流基本同相位,使电网功率因数提高到 1 附近。图 13(b)为变换器补偿电流与电网电压波形,电压重注式 STATCOM 先处于容性工况,在 0.14 s 切换到感性工况。图 13(c)和 13(d)可看出在一个周期内 STATCOM 基本可以代替电网侧补偿负载所需无功功率。通过仿真分析,在高压大功率应用中,电压重注式 STATCOM 投入后的 0.2 ms,系统就能按照负载的需求补偿相应的无功功率,验证了本文设计的电压重注式 STATCOM 控制系统具有较好的无功补偿特性。

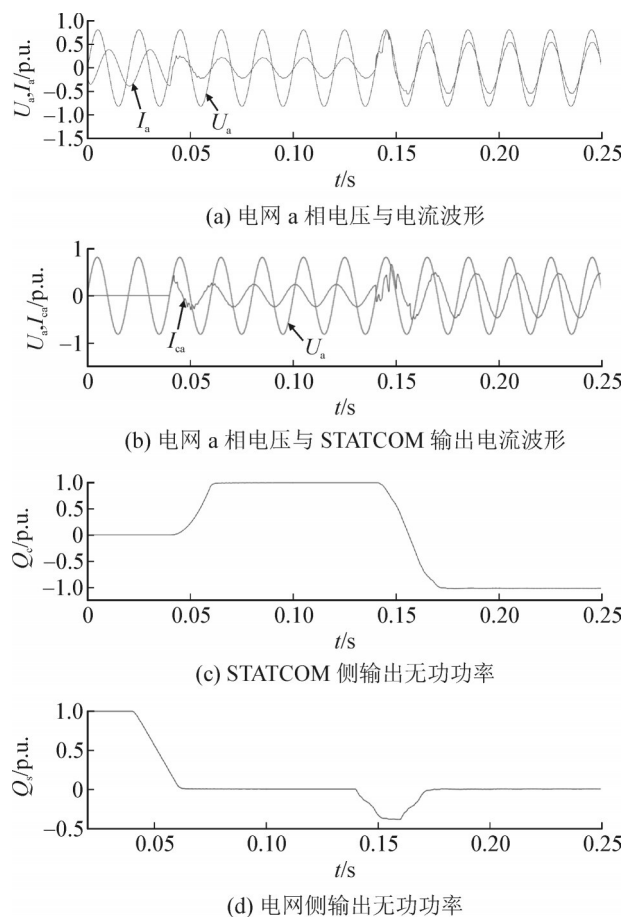


图 13 容性向感性工况切换各仿真波形图

Fig. 13 Simulation wave forms with switching from capacitive to inductive conditions

5 结语

基于等增量多阶梯波重注思想的多电平重注式 STATCOM,具有动态响应快、输出电压谐波含量小和易于并网等特点,而且非常适合于高电压、大容量的输电环境。通过仿真验证,主要结论如下:

1)通过主桥与重注支路的逻辑配合,为直流侧电容提供恒定的直流电源,重注支路的加入可以为两组主桥的开关器件提供零电压换相区间,实现了零电压开关;

2)控制电压重注式 STATCOM 的主电路重注支路触发脉冲逻辑时序,优化后的循环触发脉冲方案可以有效解决电容电压不平衡问题;

3)利用电压重注式 STATCOM 系统近似线性和单一控制变量等特点,采用传统 PI 控制器设计了系统的电流闭环控制策略,验证了该控制策略简单易行且补偿系统的补偿效果好。后期考虑研究与硬件装置相结合来对设计方案进行验证,尝试其他功率器件代替 IGBT,降低设计成本。

参考文献

- [1] 肖文静,李杰,王应芬,等. 基于 STATCOM 的无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 24-29.
XIAO Wenjing, LI Jie, WANG Yingfen, et al. Study on reactive power compensation strategy based on STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 24-29.
- [2] 罗天,汪可友,李国杰,等. 基于改进多馈入有效短路比的受端交直流混联电网 STATCOM 定容方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 133-140.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. STATCOM capacity-determine method based on modified multi-infeed effectivenesshort-circuit ratio in receiving-end AC/DC hybrid grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 133-140.
- [3] 乔春雨,易建波,谷宇杰,等. 基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 129-136.
QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage co-control based on virtual synchronous generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [4] 蒋泽度,陈卓,郝正航,等. 用于分布式风电的 LCL 型 STATCOM 控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 102-109.
JIANG Zeqian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. A study on LCL-type STATCOM control strategy for distributed wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2022,

- 38(2):102-109.
- [5] 万达,伍志荣,孟玉婵,等. 简析涉及变压器类设备纸绝缘放电的油气相色谱特征[J]. 变压器,2023,60(2):10-21.
- WAN Da, WU Zhirong, MENG Yuchan, et al. Analysis of oil gas chromatographic characteristics of paper insulation discharge in transformer equipment[J]. Transformer, 2023, 60(2):10-21.
- [6] 刘创华,刘莹,方琼. 有功注入型电压质量补偿器控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):108-114.
- LIU Chuanghua, LIU Ying, FANG Qiong. Simulation research on control strategy of voltage quality compensator based on active power injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 108-114.
- [7] 黄际元,黄珂琪,杨俊. 储能参与电网调压与动态无功支撑的协调控制策略[J]. 电器与能效管理技术,2020(10):77-83.
- HUANG Jiyuan, HUANG Keqi, YANG Jun. Coordination control strategy of energy storage participating in grid voltage regulation and dynamic reactive power support[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10):77-83.
- [8] 胡长斌,石向一,罗珊娜,等. 微电网多逆变器并联分散动态扰动补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4425-4438.
- HU Changbin, SHI Xiangyi, LUO Shanna, et al. Decentralized dynamic disturbance compensation control strategy for multiple parallel inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4425-4438.
- [9] 粟世玮,张谦,熊炜,等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源,2023,39(1):100-110.
- SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1):100-110.
- [10] 葛贤军,袁晓冬,田浩,等. 集成可再生能源发电的配电网无功优化模型[J]. 电测与仪表,2023,60(5):109-115.
- GE Xianjun, YUAN Xiaodong, TIAN Hao, et al. Reactive power optimization model for distribution network with integrated renewable energy generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 109-115.
- [11] 饶崇林,毕仁明,梁一桥,等. 移动式全桥MMC型融冰兼STATCOM装置研制[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(2):29-35.
- RAO Chonglin, BI Renming, LIANG Yiqiao, et al. Development on MMC-based mobile DC de-icing device with STATCOM function[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 29-35.
- [12] LIU YH, ARRILLAGA J, WATSON N R. Multi-level voltage reinjection-a new concept in high voltage source conversion[J]. IET Power Electronics, 2004, 151(3): 290-298.
- [13] LIU YH, ARRILLAGA J, WATSON N R. Reinjection concept: A new option for large power and high-quality AC-DC conversion[J]. IET Power Electronics, 2008, 1(1): 4-13.
- [14] LIU YH, PERERA L B, ARRILLAGA J, et al. Application of the multi-level current reinjection concept to HVDC transmission[J]. IET Power Electronics, 2007, 1(3): 399-404.
- [15] 罗振鹏,刘永和,杨宝峰. 大功率强迫换相电流注入多级变换器新拓扑[J]. 高电压技术,2015,41(7):2445-2450.
- LUO Zhenpeng, LIU Yonghe, YANG Baofeng. New topology of multi-level converter with high-power forced commutation current injection[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2445-2450.
- [16] 罗振鹏,刘永和,杨宝峰. 大功率注入式电流源型变换器拓扑和模型[J]. 电力电子技术,2015,49(3):1-4.
- LUO Zhenpeng, LIU Yonghe, YANG Baofeng. Injection current source converter topology and model of high power[J]. Power Electronics Technology, 2015, 49(3): 1-4.
- [17] 杨宝峰,王志文,罗振鹏,等. 七电平电流源型换流器无源逆变试验与分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):130-134.
- YANG Baofeng, WANG Zhiwen, LUO Zhenpeng, et al. Test and analysis of passive inversion for seven-level current source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 130-134.
- [18] 武海涛,刘永和. 一种新型SVG的拓扑与控制[J]. 电力自动化设备,2018,52(11):108-111.
- WU Haitao, LIU Yonghe. Topology and model of a novel SVG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 52(11): 108-111.
- [19] 武海涛,刘永和,王志和. 直流电流复注变换式STATCOM[J]. 电网技术,2017,41(11):3632-3640.
- WU Haitao, LIU Yonghe, WANG Zhihe. STATCOM based on DC current reinjection conversion[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3632-3640.
- [20] 武海涛,王志和,刘永和. 大功率电流源型SVG的拓扑与控制[J]. 高电压技术,2018,44(7):2300-2308.
- WU Haitao, WANG Zhihe, LIU Yonghe. Topology and control of high power current source converter SVG[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2300-2308.
- 作者简介:
- 张志艳(1995—),女,助理工程师,主要从事电力系统控制技术研究工作。
- 陈更(1995—),男,工程师,主要从事电力系统保护与控制技术研究工作。
- (下转第44页)

turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on Ansys Maxwell[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(6): 50-53.

作者简介:

李威(1992—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

潘志敏(1973—),男,正高级工程师,主要研究方向为超、特高压设备运维、检修与检测技术。

戴昀翔(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为高压

设备故障检测。E-mail:837680761@qq.com。

翟雨佳(1990—),女,副教授,主要研究方向为高温超导磁体及超导无线电能传输技术。

邓维(1973—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

毛学锋(1970—),男,工程师,主要研究方向为超、特高压设备电气试验与诊断。

岳宇宾(1986—),男,工程师,主要研究方向为智能化与数字化控制。

(上接第27页)

杨朋威(1989—),男,工程师,主要从事电力系统运行与控制技术研究工作。

陈肖璐(1991—),女,工程师,主要从事电力系统仿真分

析研究工作。

罗振鹏(1976—),男,副教授,研究方向为新能源发电、电力系统传输与控制技术。