

一种基于非线性电流跟踪算法的 STATCOM 相间 电容电压平衡控制策略

闵一博, 刘惠康, 陈天宇, 柴琳, 范利
(武汉科技大学信息科学与工程学院, 武汉 430081)

摘要:针对基于级联 H 桥拓扑结构的静止同步补偿器在传统控制框架下所产生的相间电容电压不平衡问题,采用一种新型混合调制方法并提出了一种全新的非线性分相电流控制策略。首先,基于六模块十三电平级联 H 桥拓扑结构,阐明新型混合调制的调制原理,并阐述适用于新型混合调制的相间电容电压均衡策略。其次,推导了静止同步补偿器在两相同步旋转坐标系下的控制模型,并分析指出采用 dq 解耦控制存在的相间电容电压不平衡问题。针对相间电容电压不平衡问题,提出基于三相静止坐标系下的电流分相控制策略,通过 Lyapunov 稳定性判据第二法推导并设计实现了对交流指令电流无差跟踪的非线性电流控制器。最后,在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型。仿真结果表明,所提控制策略在不同条件下均能保持相间电容电压一致和稳定,且具有良好的动态响应特性。

关键词:静止同步补偿器; 新型混合调制; 相间电容电压平衡控制; 非线性电流跟踪算法

Inter-phase Capacitive Voltage Balance Control Strategy for STATCOM Based on Nonlinear Current Tracking Algorithm

MIN Yibo, LIU Huikang, CHEN Tianyu, CHAI Lin, FAN Li

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology,
Wuhan 430081, China)

Abstract: In view of the inter-phase capacitive voltage unbalance of static synchronous compensator which is based on cascaded H-bridge topology under traditional control framework, a kind of new new hybrid modulation algorithm is adopted and a novel nonlinear current control algorithm is proposed in this paper. Firstly, the modulation principle of new hybrid modulator is described on the basis of six-module thirteen-level cascaded H-bridge topology and the same capacitive voltage balance strategy which is suitable for novel hybrid modulation is illustrated. Then, the control model of static synchronous compensator under two-phase synchronous rotating coordinate is derived and the inter-phase capacitive voltage unbalance problem of conventional dq decoupling control is indicated. Aiming at the inter-phase capacitive voltage unbalance, a separated phase current control strategy under three-phase static coordinate is proposed. A nonlinear current controller is derived and designed in accordance with the second method of Lyapunov stability criterion, which obtains error-free tracking effect to the alternative current reference. Finally, a simulation model is set up under Matlab/Simulink environment. The simulation results show that the proposed control strategy can not only keep the inter-phase capacitive voltage consistent and stable, but can also have perfect dynamic response characteristics at different conditions.

Keywords: static synchronous compensator; new hybrid modulation; inter-phase capacitor voltage balance control; nonlinear current tracking algorithm

0 引言

在现代电力系统中,无功功率的调节对电力系统安全稳定运行至关重要。随着电力系统的不断扩大和电压等级的不断提高,对无功功率补偿的要求也越来越高,无功补偿设备也朝着高电压大容量的方向发展。随着电力电子技术的发展,静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)成为新一代无功补偿设备,具有响应速度快、谐波含量小、模块化易维护、调节范围连续等诸多优点,从而受到了广泛地关注与快速地发展^[1]。

基于级联H桥拓扑结构的静止同步补偿器具有输出电压谐波含量小、响应速度快、子模块相互独立且容错率高等优点,成为高电压大容量无功补偿设备的研究与应用对象^[2-3]。但级联H桥变换器作为静止同步补偿器进行并网工作时,由于每个子模块相互独立,且投入过程中每个子模块都存在不同的导通损耗、并联损耗、驱动延时等^[4],造成子模块电容电压不平衡,不利于静止同步补偿器稳定运行和输出高质量电压波形^[5],甚至可能会造成设备工作严重失稳,烧毁硬件,因此需要对子模块电容电压进行有效地控制。

子模块电容电压的平衡控制可分为相内电容电压均衡控制和相间电容电压稳定控制,相内均压控制主要有电容电压排序法及载波或触发脉冲轮换法等,相间稳压控制主要有分级控制及注入非正序电流电压等方法^[6]。文献[7]和文献[8]采用外加电路,实现有功功率和外部系统的交换,但增加了硬件的成本。文献[9]和文献[10]采用经典dq解耦策略对STATCOM进行控制,但对于子模块较多的STATCOM,实现相内均压需要过多控制器,优化控制器参数耗费大量的时间成本。文献[11]采用三级平衡控制策略实现电容电压平衡,但采用谐振控制器会对系统的动态响应造成消极影响。文献[12]和文献[13]推导了负序电流与电容电压波动的关系,提出了注入负序电流的电容电压平衡控制方法,但实现正序与负序的解耦控制涉及大量计算,可能造成延迟。文献[14]通过结合模糊控制技术实现电容电压平衡控制,实现了控制器参数的灵活调整,但依然涉及较多控制器的设计。

针对上述问题,本文结合现有的调制方法^[15-23],提出一种新型混合调制方式,即一种全新的基于非线性电流跟踪算法的STATCOM电容电压平衡控制策略。该控制策略能有效维持STATCOM电容电压的一致和稳定,且具有良好的动态响应特性,仿真结果

验证了本文所提控制策略对电容电压控制的有效性。

1 STATCOM的混合调制方法和相内电容电压均衡策略

1.1 STATCOM的新型混合调制方法

本文应用于STATCOM的调制方法为一种新型的混合调制方法,该调制方法具有算法复杂度低、输出电压谐波特性好且易于子模块扩展等特点,有着广阔的应用前景。

当STATCOM进行并网工作时,其主电路拓扑图见图1。采用三相三线制,图1中 u_{sA} 、 u_{sB} 、 u_{sC} 为电网电压且三相对称; i_A 、 i_B 、 i_C 为STATCOM补偿电流; L 为并网电抗器等效电感; R 为电抗器和线路等效电阻; u_{cA} 、 u_{cB} 、 u_{cC} 为STATCOM输出电压; u_{sm} 为子模块电容电压; N 为STATCOM中性点。

如图1所示,主电路是一个六模块十三电平级联H桥变换器,在混合调制框架下,其每相电路是由6个全桥子模块构成的,其中5个全桥子模块是由4个开关管和1个电容构成的电容型子模块,另一个全桥子模块是由4个开关管和1个电源构成的电源型子模块。

当STATCOM工作时,每相5个电容型子模块通过式(1)计算出正向或反向投入的个数。

$$\begin{aligned} N &= \text{floor}(u_c/u_{sm}), \quad u_c > 0 \\ N &= -\text{ceil}(u_c/u_{sm}), \quad u_c < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_c 为调制波;floor为向下取整函数;ceil为向上取整函数。5个电容型子模块最高可生成十一电平的阶梯波,3个工频周期内,调制波与电容型子模块输出波形见图2。

剩余的1个电源型子模块则对调制波和5个电容型子模块输出的阶梯波间的差值进行补偿,其调制信号见图3,由调制波和阶梯波的差值进行幅值和相位的变换,再和三角载波相交所生成的。

如图3所示,若三角载波 u_i 小于 u_{ref} 且大于 $-u_{ref}$,控制电源型子模块正向导通;若三角载波 u_i 大于 u_{ref} 且小于 $-u_{ref}$,则控制电源型子模块反向导通,否则子模块处于旁路状态。STATCOM的一相输出电压见图4,为5个电容型子模块输出的阶梯波和电源型子模块输出的高频PWM波叠加而来。该调制方法相较最近电平逼近调制,有着更好的输出电压谐波特性,保证了电容电压波动时输出电压的谐波特性。相较于载波移相调制,每相仅需要一个载波发生器,节约了硬件资源,简化了硬件实现难度。

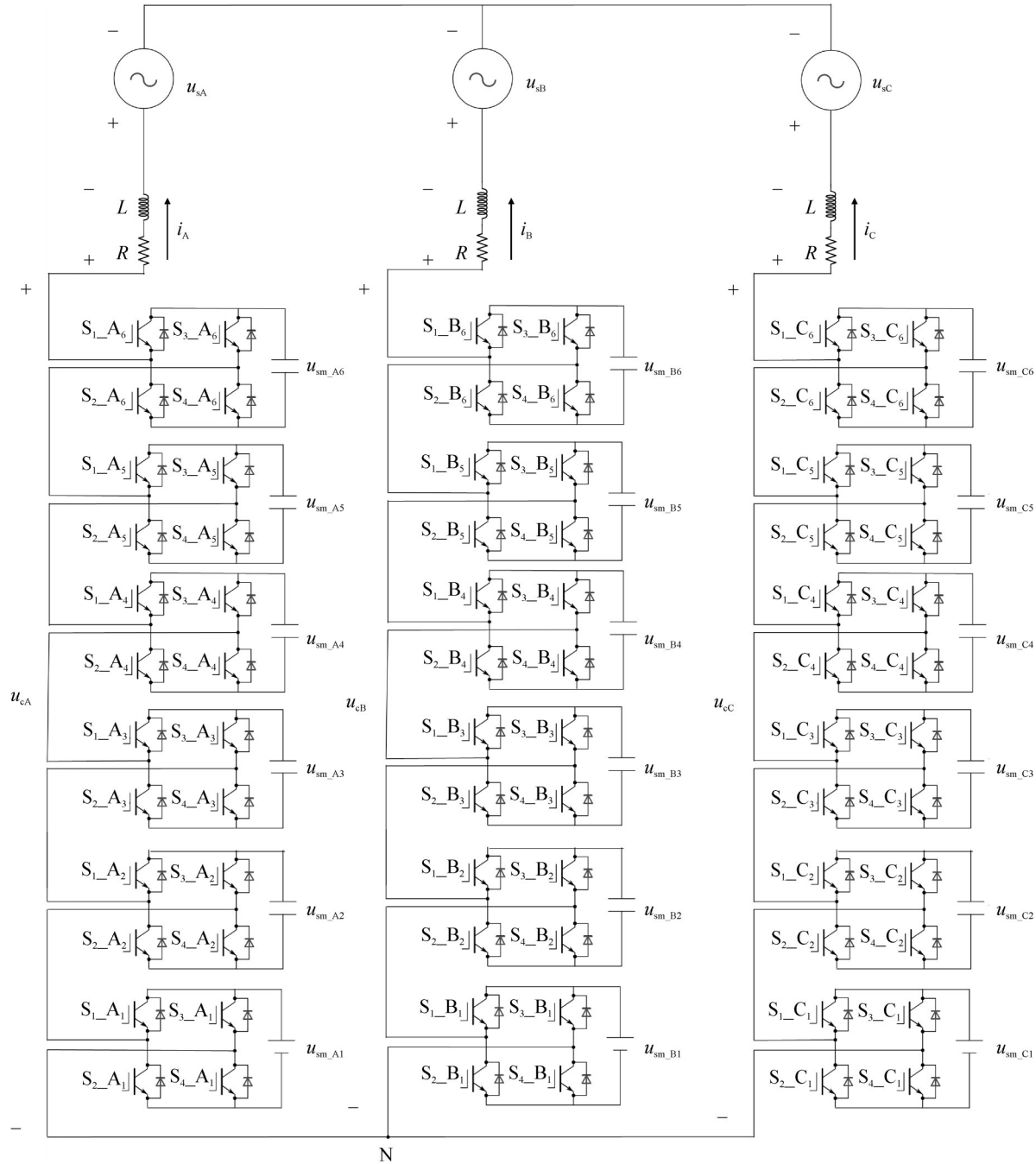


图1 STATCOM主电路拓扑图
Fig. 1 Main circuit topology of STATCOM

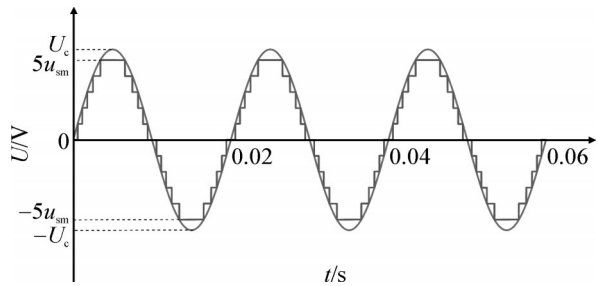


图2 调制电压波与阶梯电压波的波形
Fig. 2 Waveform of modulation wave and step voltage wave

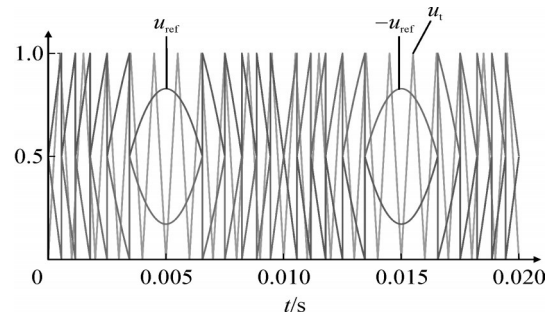


图3 电源型子模块的调制信号波形
Fig. 3 Modulation signal waveform of power sub-module

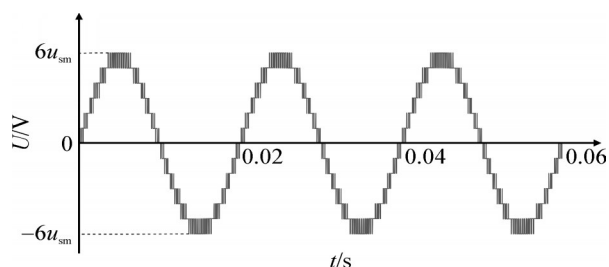


图4 STATCOM的输出电压
Fig. 4 Output voltage of STATCOM

1.2 STATCOM相内电容电压均衡策略

当静止同步补偿器并网工作时,每相的6个子模块工作状态各不相同,会造成电容子模块的极板聚集不同的电荷量,导致相内电容电压不一致,需采取必要的措施以避免电容电压的不受控。

基于新型混合调制方法,对STATCOM采用电容电压排序算法来均衡相内电容电压,每相5个电容型子模块电容电压进行采样排序后,经向上和向下取整函数判断投入子模块个数和导通状态,再通过补偿电流方向判断子模块电容的充放电状态,子模块不同工作模式下电容充放电状态见图5。当调制波大于零且输出补偿电流大于零时,投入电容型子模块处于正向导通且放电状态,子模块工作示意图如图5(a)所示,其中虚线方向表示电流流向;当调制波大于零且输出补偿电流小于零时,投入电容型子模块处于正向导通且充电状态,其示意图如图5(b)所示;当调制波小于零且输出补偿电流大于零时,投入电容型子模块处于反向导通且充电状态,其示意图如图5(c)所示;当调制波小于零且输出补偿电流小于零时,投入电容型子模块处于反向导通且放电状态,其示意图如图5(d)所示。

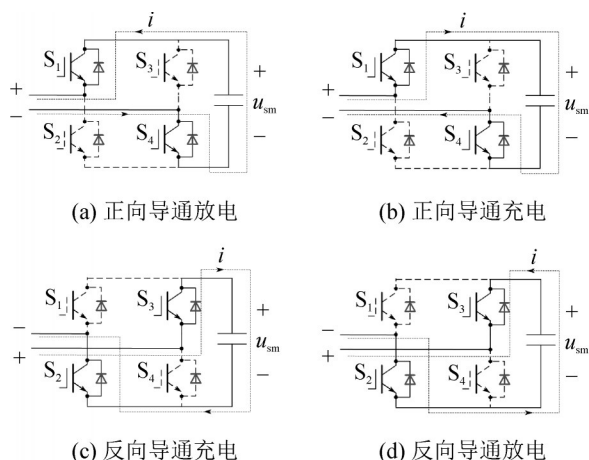


图5 子模块不同工作模式下电容充放电状态
Fig. 5 Charging and discharging state of capacitor of sub-module under different working modes

为实现相内电容电压的均衡,在判断投入的电容型子模块处于充电状态时,应投入电压较低的子模块,抬高其电容电压。在判断投入电容型子模块处于放电状态时,应投入电压较高的子模块,使其电容电压下降。基于新型混合调制的电容电压排序算法流程图见图6。在适当的采样投入频率下,该电容电压排序算法具有良好的相内电容电压均衡效果,且无需额外的控制环路设计,避免了STATCOM存在多个子模块需要整定大量参数的缺点,同时易于数字化现。

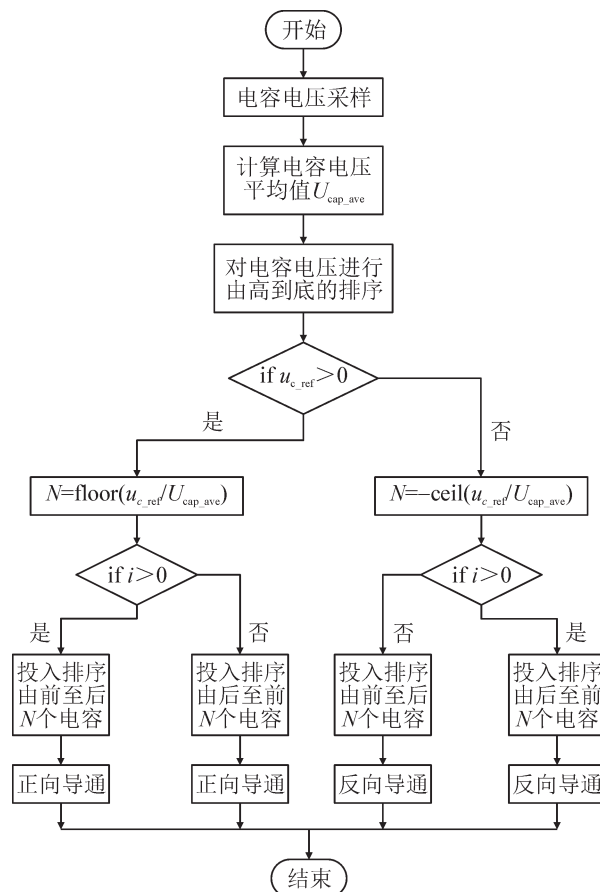


图6 电容电压排序算法流程图
Fig. 6 Flow chart of capacitive voltage sorting algorithm

1.3 STATCOM的dq解耦控制策略

1.3.1 dq解耦控制策略的数学分析

dq解耦控制策略理论研究成熟,控制器易于设计,且可以实现有功功率和无功功率的解耦控制,常在电力电子变换器中作为全局的控制策略,本节基于图1的系统拓扑图,采用dq解耦控制作为STATCOM全局控制策略,并结合含有电容电压排序算法的新型混合调制方法对并网工作的STATCOM进行分析。

STATCOM并网工作时的系统拓扑图如图1所示,已标注电压及电流的参考方向,由基尔霍夫电压定律(KVL)得系统的电压方程为

率相同。当相间存在扰动导致相间电容电压不平衡时,无法对 STATCOM 的每相分配合理的有功功率,导致相间电容电压的失稳,如图 8 所示。图 8 为 STATCOM 所有电容型子模块的电容电压在 dq 解耦控制下的波形,相内采取了电容电压排序算法的均压措施,保障了相内电容电压的一致性,但相间的电容电压出现了发散。

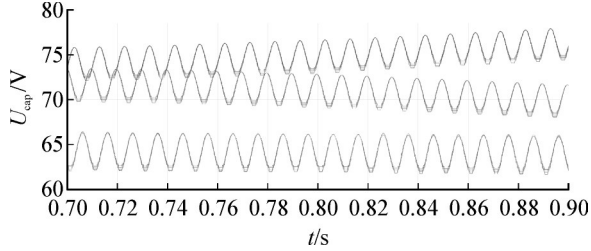


图8 dq解耦控制电容电压

Fig. 8 Capacitor voltage of dq decoupling control

虽然 dq 解耦控制存在有功功率控制环路,但不能有效控制相间电容电压至指令值,仅能控制 STATCOM 的电容型子模块电压的平均值达到指令值,如图 9 所示,指令值为 70 V,STATCOM 三相 15 个电容型子模块电容电压在稳态时,其平均值在指令值附近脉动。dq 解耦控制算法投入时间越长,相间电容电压发散的状况就会愈发严重,所导致的相间电容电压不平衡会影响 STATCOM 输出的电压质

量和其安全运行。

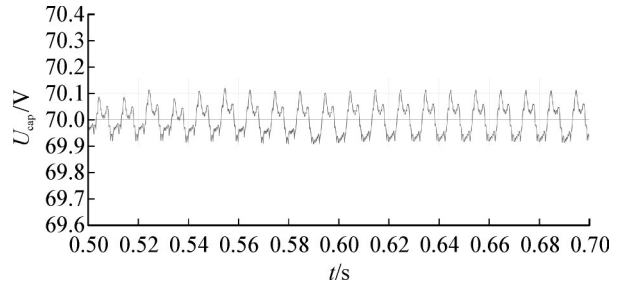


图9 dq解耦控制电容电压平均值与指令值

Fig. 9 Average and instruction value of capacitive voltage in dq decoupling control

为有效解决 STATCOM 在采用 dq 解耦控制中存在相间电容电压不平衡的问题,本文提出一种全新的分相电流控制策略,该控制策略能根据 STATCOM 每相电容电压与指令值的差距动态分配 STATCOM 每相所需的有功功率,达到维持 STATCOM 相间电容电压的稳定及三相子模块电容电压的一致性的目的。

2 STATCOM 相间电容电压控制新方法

2.1 分相电流控制的全局控制策略

为实现对 STATCOM 每相分配合理的有功功率,保持相间电容电压的一致性,在控制器设计上,采用分相电流控制策略,整体的控制框图见图 10。

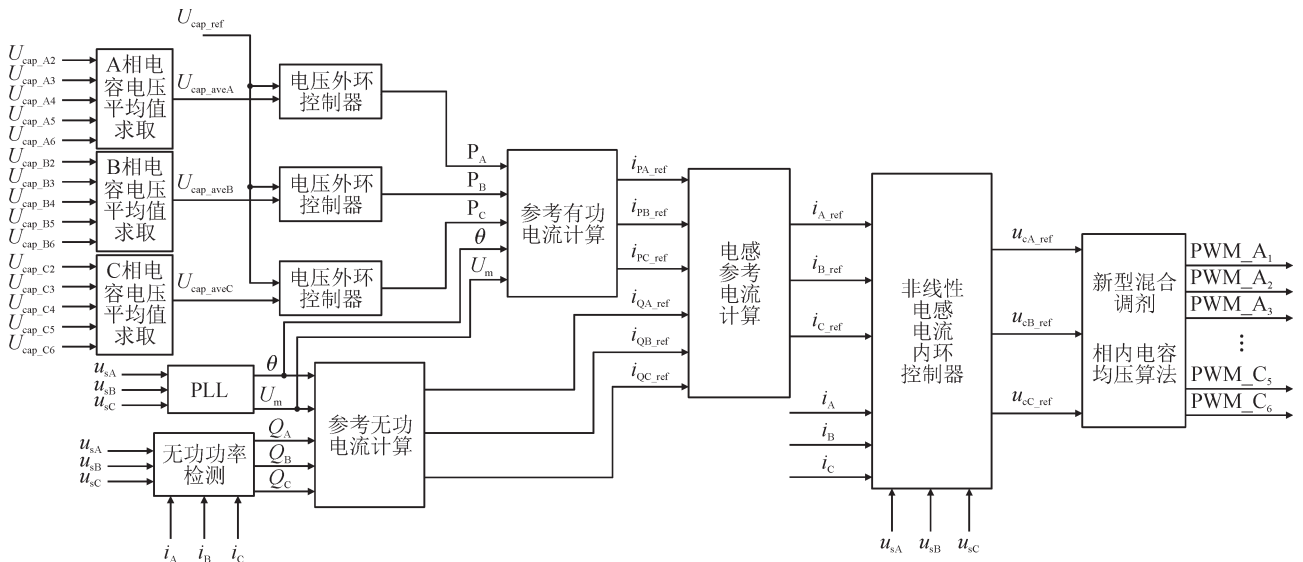


图10 分相电流控制框图

Fig. 10 Block diagram of separated phase current control strategy

采用分相电流控制时 STATCOM 每相的功率控制相较于 dq 解耦控制均独立,每相参考有功功率由每相电容电压的平均值与指令值作差,经过电压外环控制器生成,每相指令无功功率由无功检测环节得到,每相指令有功功率与指令无功功率经计算得到每相补偿电流的参考值(即参考电感电流),每

相参考补偿电流与实际补偿电流经过非线性电流内环控制器,生成 STATCOM 每相指令输出电压。

对比 dq 解耦控制,该分相电流控制策略能根据 STATCOM 每相电容电压的波动从而实现对其分配合理的有功功率,以此调节 STATCOM 每相电容电压,维持三相电容电压一致和稳定,确保

STATCOM 安全稳定高效地运行。

分相电流控制的关键在于在三相静止坐标系下实现对交流参考补偿电流的无差跟踪,在电流环控制器的设计上,本文通过 Lyapunov 稳定性判据第二法,推导出 STATCOM 参考输出电压表达式,设计非线性电流控制器,实现对交流参考补偿电流的无差跟踪。

2.2 分相电流控制的控制器设计

2.2.1 电压外环控制器的设计

电压外环控制器通过每相电容电压的平均值与指令值作差,经控制器后,生成调节 STATCOM 每相电容电压所需的有功功率,忽略 STATCOM 与电网进行无功功率交换时,电容电压的二倍频波动,每相电容电压可视作直流量,采用 PI 控制器即可达到预期要求,电压外环控制器的结构框图见图 11。

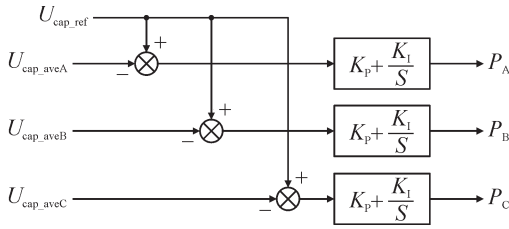


图 11 电压外环控制框图

Fig. 11 Block diagram of external voltage loop controll

2.2.2 参考补偿电流计算

电压外环控制器和无功功率检测环节分别得到 STATCOM 每相输出的有功功率和无功功率参考值,再根据锁相环得到的电网电压幅值 U_m 及电网电压 A 相的相角 θ_A ,通过相量法计算得到 STATCOM 每相参考补偿电流,以 A 相为例,其参考补偿电流相量计算公式为

$$\begin{cases} I_{PA_ref} = \frac{\sqrt{2} P_A}{U_m} \angle \theta_A - \pi \\ I_{QA_ref} = \frac{\sqrt{2} P_A}{U_m} \angle \theta_A - \frac{\pi}{2} \\ I_{A_ref} = I_{PA_ref} + I_{QA_ref} \end{cases} \quad (7)$$

再由式(7)推导可得 A 相参考补偿电流的瞬时值,公式为

$$\begin{cases} S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} \\ \varphi_A = \arctan(P_A / Q_A) \\ i_{A_ref} = \frac{2S_A}{U_m} \cos\left(\theta_A \pm \frac{\pi}{2} - \varphi_A\right) \end{cases} \quad (8)$$

若输出感性无功,则参考补偿电流相角应滞后电网电压,反之则超前,同理 B 相与 C 相参考补偿电流可按式(7)与(8)进行对应的瞬时值计算。

2.2.3 电流内环控制器的设计

电流内环控制器需实现补偿电流对参考补偿

电流的无差跟踪,生成 STATCOM 的参考输出电压。参考补偿电流为三相静止坐标系下的工频交流流量,若采用经典控制理论设计,当电流内环控制器采用比例控制器,则会存在幅值和相位的稳态跟踪误差,影响控制效果;采用比例谐振或准比例谐振控制器可以实现对特定频率的交流流量进行无差跟踪,但其传递函数难以精确离散化,硬件实现难以达到理论预期。为实现无差跟踪参考补偿电流,且有效提高系统动态响应特性,本节将基于 Lyapunov 稳定性判据第二法,设计非线性电流控制器。

根据 Lyapunov 稳定性判据第二法,系统状态方程 $\dot{x}(t)=f(x(t))$,构造标量函数 $V(x)$ 代表系统广义能量,若标量函数 $V(x)$ 满足:

$$\begin{cases} V(x) > 0, & x \neq 0 \\ V(x) = 0, & x = 0 \\ V(x) = \frac{dV(x)}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f(x_i) < 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

则可判断系统是渐近稳定的,若系统状态方程满足 $\dot{x}(t)=-kx(t)$, k 为常数且不为 0,其唯一平衡点为 $x_e=0$,构造 Lyapunov 函数 $V(x)=x^2/2$,且其对时间的导数 $\dot{V}(x)=xx'=-kx^2$,此时若 $k>0$,则构造函数完全满足式(9),即系统是渐近稳定的,可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} x = x_e = 0$ 。

若将参考补偿电流与实际补偿电流的误差 $e_L = i_{ref} - i$,作为系统状态变量,且满足 $\dot{e}_L = -ke_L$,构造 Lyapunov 函数,若 $k>0$,则构造的函数满足

$$\begin{cases} V(e_L) = e_L^2/2 > 0, & e_L \neq 0 \\ V(e_L) = -ke_L^2 < 0, & e_L \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

则 $\lim_{t \rightarrow \infty} x = x_e = 0$ 。

即电流误差满足状态方程,则可判断电流误差将最终趋向于零,实现实际补偿电流对指令补偿电流的无差跟踪。电流误差满足 $\dot{e}_L = -ke_L$,由式(11)可联立推导,得到 STATCOM 三相参考输出电压的表达式为

$$\begin{cases} e_L = i_{ref} - i \\ \dot{e}_L = -ke_L \\ Ri + L \frac{di}{dt} = u_c - u_s \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_{cA_ref} = L(\dot{i}_{A_ref} + ke_{L_A}) + u_{sA} + Ri_A \\ u_{cB_ref} = L(\dot{i}_{B_ref} + ke_{L_B}) + u_{sB} + Ri_B \\ u_{cC_ref} = L(\dot{i}_{C_ref} + ke_{L_C}) + u_{sC} + Ri_C \end{cases} \quad (12)$$

基于上式推导,设计电流内环控制器,误差变化规律符合指数函数变化规律,如式(13)所示,选取合适的参数值,可实现误差随时间快速趋于零,实现对参考补偿电流的无差跟踪:

$$e_L = e^{-kt} \quad (13)$$

电流内环控制器框图如图 12 所示,每相参考补偿电流经求导后,与电网相电压及每相电流误差计算得到 STATCOM 的每相参考输出电压。

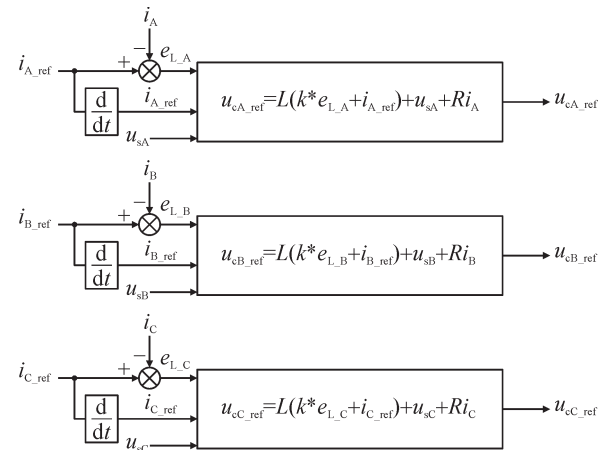


图 12 电流内环控制框图
Fig. 12 Block diagram of inner current loop control

3 仿真分析

3.1 仿真模型搭建

本节基于 Matlab/Simulink 仿真平台,根据图 1 所示 STATCOM 并网拓扑,搭建六模块十三电平基于级联 H 桥拓扑结构的静止同步补偿器模型,并在下文进行控制策略的仿真验证,仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数 Table 1 Simulation parameters	
参数	数值
电网相电压幅值/V	$220\sqrt{2}$
电网相电压频率/Hz	50
子模块电容/ μF	8 800
子模块电源电压/V	110
并网电抗器等效电感/mH	4
线路等效电阻/m Ω	10
电容电压指令值/V	70/100
电压外环比例控制器系数	195
电压外环积分控制器系数	1 680
电流内环控制器 k 值	5 000
子模块开关器件频率/Hz	4 000

3.2 定无功输出电容电压启动响应

设每相指令无功功率为恒定的 2 750 var,即向电网注入感性无功功率,STATCOM 三相 15 个电容型子模块电容电压波形如图 13 所示,0~0.1 s 为预充电状态,此时所有开关管均为关断状态,电网电压经续流二极管整流后向子模块电容充电,0.1 s 后控制算法投入,在约 0.4 s 时,电容电压稳定在电容电压指令值 70 V 左右,随着仿真时间的推移,

STATCOM 电容电压均稳定在指令值,相间电容电压具有良好的一致性。

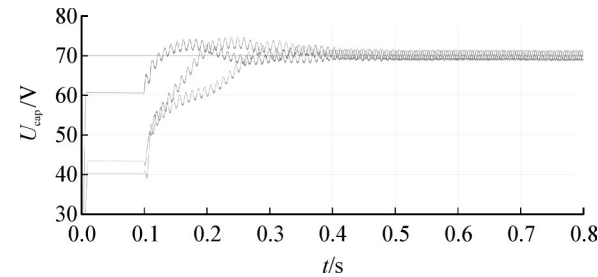


图 13 定无功输出STATCOM 电容电压波形
Fig. 13 Capacitor voltage waveform of STATCOM with constant reactive power output

待电容电压稳定后,STATCOM 输出补偿电流如图 14 所示,可见 STATCOM 输出的补偿电流具有良好的三相对称性及谐波特性。

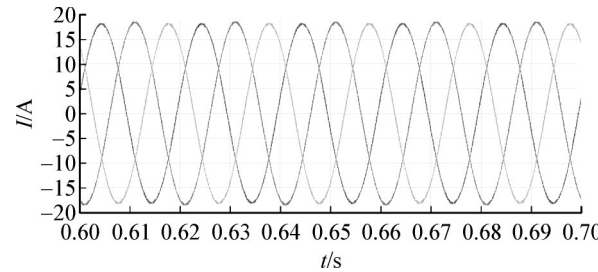


图 14 定无功输出STATCOM 补偿电流波形
Fig. 14 Compensation current waveform of STATCOM with constant reactive power output

3.3 无功指令阶跃电容电压及补偿电流响应

在 STATCOM 子模块电容电压达到稳态后,在 1.0 s 时,每相指令无功功率由 2 750 var 阶跃至 6 500 var,在 1.4 s 时,每相指令无功功率再由 6 500 var 恢复至 2 750 var,其电容电压及补偿电流波形见图 15。

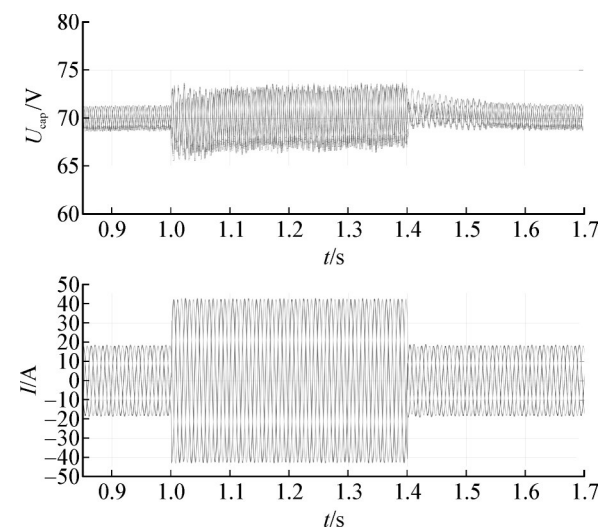


图 15 无功阶跃电容电压及补偿电流波形
Fig. 15 Reactive step capacitor voltage and compensation current waveform

由图 15 可见,当输出无功功率增大时,电容电压响应迅速,经过短暂的暂态后,依然保持一致且稳定在 70 V,同时电容电压的二倍频幅值波动增大,输出更大的补偿电流;当减小输出无功功率,同理电容电压的二倍频幅值波动会减小,经过 0.1 s 左右的暂态时间后,电容电压保持一致,且稳定在指令值。指令无功功率阶跃时,由图 14 可见,补偿电流也响应快速且具有良好的谐波特性,有利于 STATCOM 并网运行。

3.4 电容电压指令阶跃响应

为深入验证本文所提控制策略对于相间电容电压的控制效果,在指令无功功率恒为 2 750 var 的条件下,待电容电压稳定在 70 V 后,在 0.8 s 时令电容电压指令值阶跃值 100 V;在 1.4 s 时电容电压指令值恢复为 70 V,STATCOM 子模块电容电压波形见图 16。由图 16 可见,当电容电压指令值阶跃后,电容电压在 1.0 s 左右达到 100 V 的指令值,且相间电容电压一致性良好,未出现相间电容电压发散的情况;指令电容电压恢复为 70 V 时,电容电压响应迅速,经 0.2 s 后,电容电压降至指令电压,相间电容电压依旧保持良好的一致性,验证了该控制策略对电容电压控制的有效性,且电容电压动态响应特性良好,利于电容电压的灵活调整。

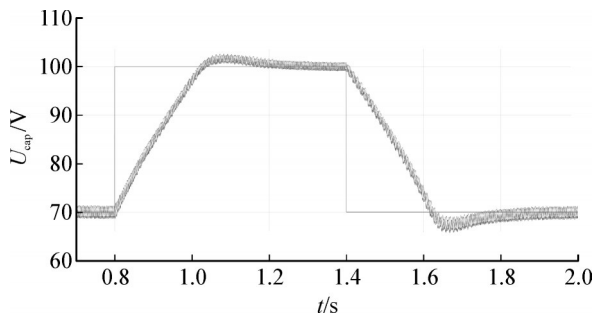


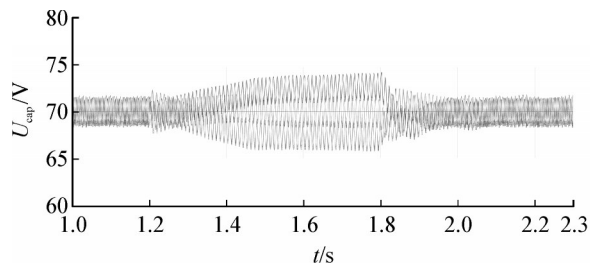
图 16 指令电容电压阶跃电容电压波形
Fig. 16 Command capacitor voltage step capacitor voltage waveform

3.5 控制策略切换时电容电压响应

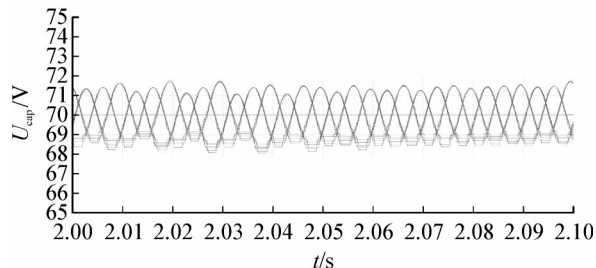
为深入验证本文所提分相电流控制策略对 dq 解耦控制所存在的相间电容电压不平衡问题解决的有效性,本节通过控制策略的切换,观测子模块电容电压波形来对分相电流控制策略的相间电容电压平衡能力进行验证。

采用分相电流控制策略,保持电容电压稳定在指令值 70 V 至 1.2 s,在 1.2 s 将控制策略切换为上文所述的 dq 解耦控制,当仿真时间到达 1.8 s 时,再将控制策略切换为本文所提的分相电流控制,STATCOM 的子模块电容电压波形见图 17。由图 17(a)可见,

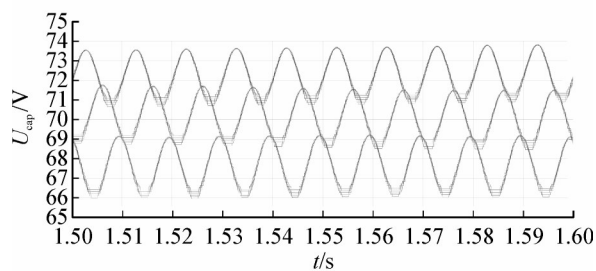
1.2 s 前本文所提分相电流控制策略将三相电容电压稳定至指令值 70 V,在控制策略切换为 dq 解耦控制后,相间电容电压出现了发散,其具体原因本文 1.3.2 节已经进行分析,随着时间的推移,相间电容电压不平衡的状况愈发严重,对 STATCOM 安全高效运行非常不利,在 1.8 s 后,将控制策略切换回分相电流控制策略,经过短暂的电容电压波动后,三相电容电压重新收敛,且恢复到 70 V 的指令值,有效解决了相间电容电压不平衡的问题。为更直观显示不同控制策略电容电压波动状况,图 17(b)和图 17(c)分别截取了 5 个工频周期内,采用不同控制策略电容电压的波动状况,由图 17 可见,采用分相电流控制策略后,相间电容电压收敛且具有良好的一致性,本文所提分相电流控制策略有效解决了 STATCOM 相间电容电压不平衡的问题。



(a) 电容电压全局波形



(b) 分相电流控制电容电压局部波形



(c) dq 解耦控制电容电压局部波形

图 17 控制策略切换时电容电压波形
Fig. 17 Capacitor voltage waveform during control strategy switching

4 结语

本文以新型混合调制为调制方法,针对 STATCOM 相间电容电压不平衡问题提出了一种非线性分相电流控制策略,仿真结果表明本文所提的

控制策略有效解决了采用 dq 解耦控制所存在的相间电容电压不平衡问题,根据上文总结出新型混合调制方法及非线性分相电流控制策略具有的特点:

1)新型混合调制中,每相存在一个电源子模块对调制波及电容子模块输出阶梯波的差值进行补偿,保障了输出电压的质量。STATCOM 需要扩充子模块仅需扩充参与阶梯波调制的电容型子模块,减小了扩充子模块时变更算法的难度,且节约了数字处理器的 PWM 资源,有利于 STATCOM 在高压大容量场合的应用;

2)本文所提非线性分相电流控制策略可以对 STATCOM 每相电容电压进行有效调节,仿真结果表明,该控制策略能有效保持 STATCOM 相间电容电压的一致性和稳定性,对于已经发散的相间电容电压,投入该控制算法后,仍可以实现相间电容电压的收敛,具良好的控制效果和动态响应特性;

3)该控制策略的控制器结构简洁,设计控制器无需大量的参数整定,有效减少了优化控制器参数所投入的时间成本和过多控制环路对系统动态响应带来的不利影响;

4)该控制策略适用性广,不仅仅只适用于基于新型混合调制的 STATCOM 控制,对其他调制方法及基于级联 H 桥拓扑结构的光伏并网逆变器和有源滤波器等电力电子变换器提供了全新的电容电压平衡控制思路,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 陈继开,胡阳,李浩茹,等.级联H桥STATCOM直流电压失衡分析与控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):36-43.
CHEN Jikai, HU Yang, LI Haoru, et al. DC voltage unbalance analysis and control strategy for cascaded H-bridge STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 36-43.
- [2] SHI Jianjiang, GOU Wei, YUAN Hao, et al. Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1156-1166.
- [3] 吴丽然,吴命利.级联H桥型变流器直流电压均衡控制[J].电力自动化设备,2017,37(10):100-106.
WU Liran, WU Mingli. DC voltage balancing control for cascaded H-bridge converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 100-106.
- [4] ZHAO Tiefu, WANG Gangyao. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1523-1532.
- [5] 刘文亚,姚钢,何雯,等.基于级联多电平有源滤波器直流侧电压平衡控制[J].电力系统保护与控制,2015,43(4):94-101.
LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, et al. Research of DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 94-101.
- [6] 刘秋降,吴命利,吴丽然.级联H桥变流器电容电压均衡约束条件[J].电力系统自动化,2016,40(15):113-119.
LIU Qiujiang, WU Mingli, WU Liran. Constraints for balancing capacitor voltage of cascaded H-bridge converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 113-119.
- [7] WOODHOUSE ML, DONOGHE MW, OSBOMEMM. Type testing of the GTO valves for an STATCOM converter[C]//2001 Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, 2001, 485:89-90.
- [8] 刘文华,宋强,滕乐天,等.基于链式逆变器的50 MVA静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2004,24(4):145-150.
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. Balancing control of DC voltage of 50 MVA STATCOM based on cascaded multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150.
- [9] 汪玉凤,段本涛,赵维东.H桥级联STATCOM直流侧电容电压平衡控制的研究[J].高压电器,2018,54(3):122-127.
WANG Yufeng, DUAN Bentao, ZHAO Weidong. Research on DC capacitor voltage balance control for cascaded H-bridge STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 122-127.
- [10] 李玲玲,鲁修学,吉海涛,等.级联H桥型SVG直流侧电压平衡控制方法[J].电工技术学报,2016,31(9):1-7.
LI Lingling, LU Xiuxue, JI Haitao, et al. A balancing control method of DC side voltage for cascaded H-bridge static var generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 1-7.
- [11] 徐榕,于泳,杨荣峰,等.H桥级联STATCOM直流侧电容电压平衡控制方法[J].电力自动化设备,2015,35(5):15-22.
XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, et al. DC capacitor voltage balance control of H-bridge cascaded STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 15-22.
- [12] 赵波,郭剑波,周飞.链式STATCOM相间直流电压平衡控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(34):36-41.
ZHAO Bo, GUO Jianbo, ZHOU Fei. DC voltage balance control strategy among phases for cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(34): 36-41.
- [13] 王志冰,于坤山,周孝信.H桥级联多电平变流器的直流母线电压平衡控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(6):56-63.

- WANG Zhibing, YU Kunshan, ZHOU Xiaoxin. Control strategy for DC bus voltage balance in cascaded H-bridge multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6):56-63.
- [14]袁义生,陈旭,兰梦罗. 级联H桥整流器输出电压平衡模糊PI控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(11):116-122.
- YUAN Yisheng, CHEN Xu, LAN Mengluo. Fuzzy PI control strategy for output voltage balance of cascaded H-bridge rectifier[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(11):116-122.
- [15]叶满园,肖云煌,康翔,等. 混合H桥级联多电平逆变器功率均衡控制方法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(12):54-61.
- YE Manyuan, XIAO Yunhuang, KANG Xiang, et al. Power balance control scheme of cascaded multilevel inverters with hybrid H-bridge units[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(12):54-61.
- [16]胡文华,刘剑锋,曹仁赢. 混合级联H桥逆变器的改进拓扑及其混合调制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6):146-150.
- HU Wenhua, LIU Jianfeng, CAO Renying. Improved topology of hybrid cascaded H-bridge inverter and its hybrid modulation method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6):146-150.
- [17]BABU N, FERNANDES B G. Cascaded two-level inverter-based multilevel static var compensator using 12-sided polygonal voltage space vector modulation[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(8):1500-1509.
- [18]朱建军,孙阳,常鹏,等. 基于等效惯量辨识的光伏调频控制优化策略[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(5):111-118.
- ZHU Jianjun, SUN Yang, CHANG Peng, et al. Photovoltaic frequency regulation control optimization strategy based on equivalent inertia identification[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5):111-118.
- [19]赵鋈,艾远高,向强铭,等. 适用于电流源型逆变器的SVPWAM调制策略及其损耗分析[J]. 电器与能效管理技术, 2022(12):61-69.
- ZHAO Yun, AI Yuangao, XIANG Qiangming, et al. SVPWAM modulation strategy and its loss analysis for current source inverter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(12):61-69.
- [20]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.
- [21]张义,彭佩佩,唐冰婕,等. 考虑预测误差的风电有功功率控制策略[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(6):76-82.
- ZHANG Yi, PENG Peipei, TANG Bingjie, et al. Active power control of wind power considering power forecasting error[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(6):76-82.
- [22]石振刚,吴跃斌,孙冲,等. 新型双钳位三电平PWM整流器双平衡调制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1):183-189.
- SHI Zhengang, WU Yuebin, SUN Chong, et al. Research on double-balanced modulation strategy of the new twin-clamp three-level PWM rectifier[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1):183-189.
- [23]洪邦光,陈威,张海跟. 基于TSK模糊自适应PI控制的移相全桥变换器的设计与仿真[J]. 电器与能效管理技术, 2021(4):70-76.
- HONG Bangguang, CHEN Wei, ZHANG Haigen. Design and simulation of phase-shifted full-bridge converter based on TSK fuzzy adaptive PI control[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(4):70-76.
- 作者简介:**
- 闵一博(1998—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子变换器控制技术及电力系统无功补偿。E-mail:569127771@qq.com。
- 刘惠康(1963—),男,教授,研究方向为智能控制、新型电气传动方向。E-mail:liuhuikang@wust.edu.cn。
- 陈天宇(1992—),男,讲师,通信作者,研究方向为集成式电机驱动系统及高性能电力电子变换器。E-mail:chentianyu@wust.edu.cn。
- 柴琳(1979—),男,副教授,研究方向为新型电气传动、智能控制、工业网络控制。E-mail:235126698@qq.com。
- 范利(1998—),女,硕士研究生,研究方向为逆变器控制策略。E-mail:flwust@163.com。