

虚拟同步机控制策略下的 STATCOM 相间 电容电压平衡方法研究

范利, 刘惠康, 柴琳, 陈天宇

(武汉科技大学教育部冶金自动化与检测技术工程研究中心, 武汉 430081)

摘要: 针对基于直挂式级联 H 桥拓扑结构的静止同步补偿器在运行时产生的相间电容电压不平衡的问题, 本文在虚拟同步机的控制策略基础上提出了一种平衡相间电容电压的方法。虚拟同步机具有响应速度快的优点, 但用于静止同步补偿器来作无功补偿时会产生相间电容电压不平衡的问题。因此本文首先引入电容电压平均值来完成虚拟同步机的快速并网, 其次将虚拟同步机算法的无功调节分为 3 部分来实现分相无功补偿, 再在电压合成前引入电容电压平均值作反馈, 以实现相间电容电压平衡。最后在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型, 验证了所提控制策略能有效解决相间电容电压不平衡问题, 并且仿真结果表明所提控制策略具有良好的动态响应特性。

关键词: 静止同步补偿器; 虚拟同步机控制策略; 相间电容电压平衡; 级联 H 桥变换器

Research on Inter-phase Capacitive Voltage Balance Method of STATCOM Under Virtual Synchronous Machine Control Strategy

FAN Li, LIU Huikang, CHAI Lin, CHEN Tianyu

(Engineering Research Center of Metallurgical Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, 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 method to balance the inter-phase capacitive voltage is proposed on the basis of the control strategy of virtual synchronous machine. Virtual synchronizer has the advantage of fast response which, however, will cause the inter-phase capacitive voltage unbalance when used for static synchronization compensator to compensate reactive power. Therefore, the average capacitive voltage is introduced to complete the fast grid connection of the virtual synchronizer. Then, the reactive power adjustment of the virtual synchronizer algorithm is divided into three parts to achieve the phase-split reactive power compensation. Moreover, the average capacitive voltage is introduced as feedback before the voltage synthesis to achieve the balance of inter-phase capacitive voltage. Finally, a simulation model is set up under Matlab/Simulink environment to verify that the proposed control strategy can effectively solve the issue of inter-phase capacitive voltage unbalance. The simulation results show that the proposed control strategy has good dynamic response characteristics.

Keywords: static synchronous compensator; virtual synchronizer control strategy; balance of inter-phase capacitive voltage; cascade H-bridge converter

0 引言

多电平拓扑电路是一种常用于中压大功率电能变换或中压大功率电力传动的解决方案^[1]。级联

H 桥多电平变换器具有易于模块化、实用价值高、没有额外增加用作钳位的二极管和电容、技术相对成熟、控制方法简单且多样的优点^[2]。三相级联 H 桥多电平变换器主要应用于高压配网等高压场合

收稿日期: 2023-01-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805100)。

中,由于各H桥子模块相当于一个悬浮电源,当各相间H桥负载不平衡时,各H桥模块由于其输入功率与输出功率无法做到动态匹配而导致直流电容电压不平衡,从而影响相间各H桥模块后级负载模块以及级联整流器的正常的工作^[3]。因此级联变流器直流侧相间电容电压的平衡问题亟待解决。

虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术因具有惯性和阻尼特性且能参与电网电压和频率的调节,引起了国内外学者的广泛关注和研究。2007年德国Beck H. P.团队首次提出电流型VSG控制方案^[4],但该方案不适用于孤岛运行。2008年,比利时鲁汶大学J. Driesen团队基于欧洲“VSYNC”工程提出电压型VSG控制方案^[5-7],但并未模拟其电压调节特性^[8]。随着VSG技术的不断发展,主要应用在微电网、柔性直流输电以及电动汽车充电柜等领域。文献[9]针对光伏发电过程中惯量阻尼缺失问题将VSG应用在受端换流器的控制中,以提供频率支撑;文献[10]将VSG应用在电动汽车(vehicle-to-grid, V2G)充放电具体结构中,实现了功率的双向调节;文献[11]引入改进的VSG控制策略以解决微网在并网切换时的电压电流突变不稳定的问题。

目前针对相间电容电压平衡问题的方式主要分为两种。

1) 上层均压法

文献[12-14]是通过H桥输出电压波形的移相,改变电流与电压相位关系,从而调整各H桥吸收的有功功率,实现相间电压调节功能。文献[15-16]是

通过计算得到负序电压指令控制开关管工作,改变有功功率的分配。但上层均压法并不适用于大容量静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)系统,且易造成系统不稳定。

2) 分层控制法

分层控制法即调节有功控制总体电压平衡,再控制相间、相内电压平衡。文献[17-18]是通过在工频侧注入负序电流实现相间直流电压平衡。文献[19-20]是通过注入零序电压的方式实现相间电压平衡,使系统内部不平衡的功率可以在三相之间交换。文献[21]是设计了一种装置,根据相间压差经PI控制获得零序电压从而实现负序电流输出控制。但分层控制法控制结构复杂,控制对象较多。

现有的电压均衡算法难以直接应用在虚拟同步机控制策略上,因此有必要提出一种基于VSG算法的相间电容电压平衡控制策略。该控制策略改进了经典VSG算法,有效稳定STATCOM直流侧相间电容电压稳定和一致,且具有较好的动态响应特性,仿真结果验证了本文所提控制策略的有效性。

1 基于VSG控制策略的STATCOM

1.1 经典VSG控制策略

VSG的有功频率调节,实现对同步发电机一次调频、转动惯量和阻尼特性的模拟,VSG无功电压调节,实现对同步发电机调压特性的模拟,VSG的有功-频率调节分为原动机调速和转子运动方程两部分,其控制框图见图1。

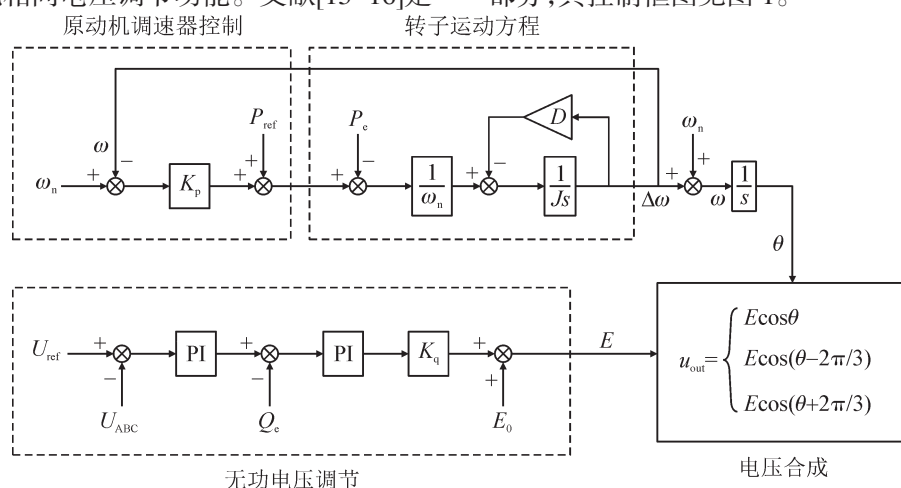


图1 VSG控制框图
Fig. 1 VSG control block diagram

其二阶模型为

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D\Delta\omega \quad (1)$$

$$E = E_0 + K_q(Q_{ref} - Q_e) \quad (2)$$

式中: J 为转动惯量; $\Delta\omega = (\omega_n - \omega)$; P_m 为VSG机械功率; P_e 为VSG电磁功率; D 为阻尼系数; Q_e 为实

际无功功率; E 为 VSG 输出虚拟内电势; E_0 为额定内电势; K_q 为无功下垂系数。

原动机调速器公式为

$$P_m = P_{\text{ref}} + K_p(\omega_n - \omega) \quad (3)$$

式中, K_p 为有功下垂系数。

测量模块测得电网侧电压电流, 即 u_{sABC} 、 i_{sABC} , 经计算得到电磁有功功率 P_e 和无功功率 Q_e , 如式(4)、(5)所示, 其中 φ 为电网侧电压电流夹角。

$$P_e = \frac{2}{3}UI \cos \varphi \quad (4)$$

$$Q_e = \frac{2}{3}UI \sin \varphi \quad (5)$$

1.2 STATCOM主电路拓扑结构

本文建立的级联 H 桥型 STATCOM 拓扑结构见图 2。图中: u_{sA} 、 u_{sB} 、 u_{sC} 为电网电压; Z_s 为电网阻抗; Z_L 为负载阻抗; i_{XdA} 、 i_{XdB} 、 i_{XdC} 为 STATCOM 输出电流; X_d 为 STATCOM 输出电抗。

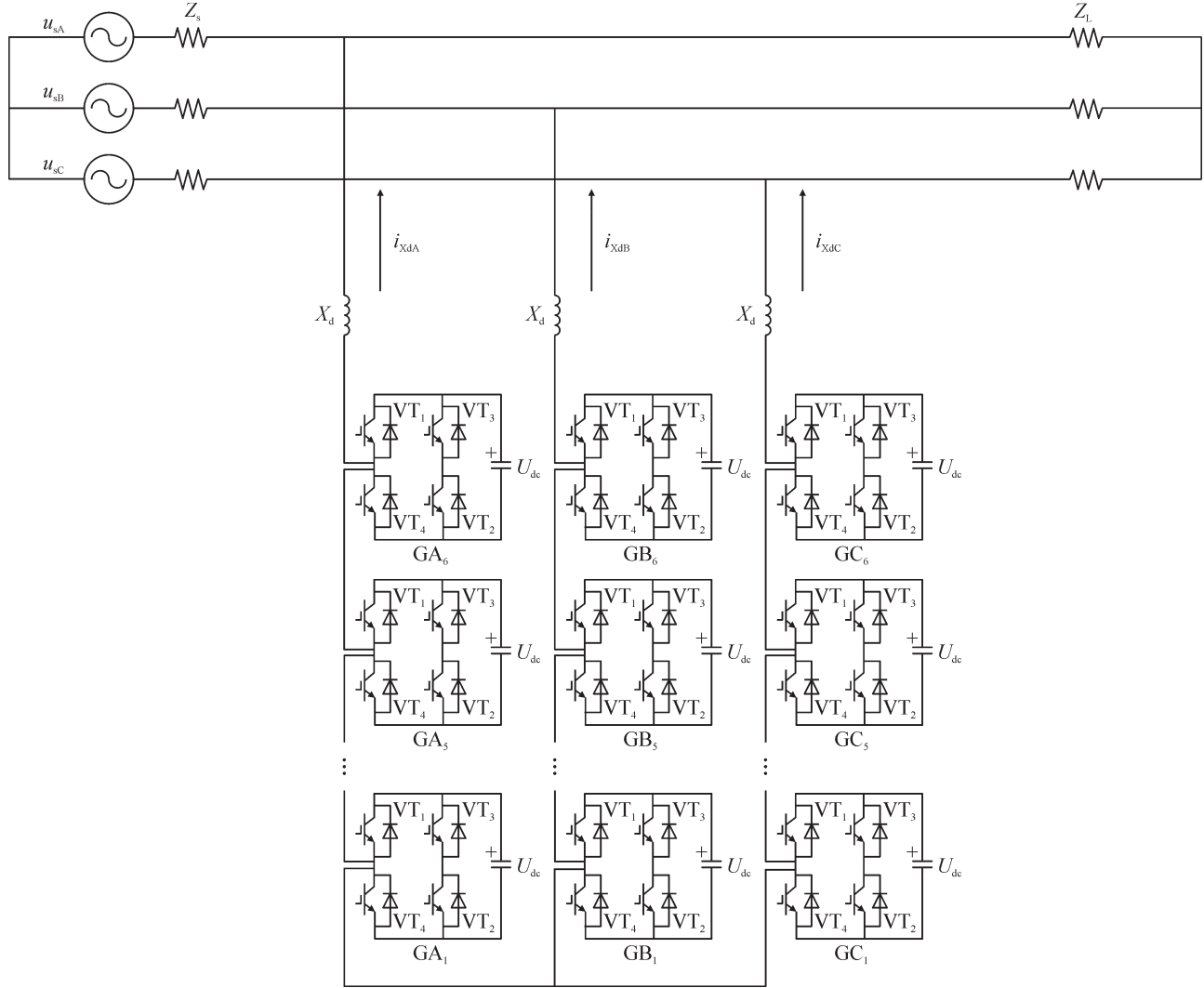


图2 STATCOM主电路拓扑图
Fig. 2 Main circuit topology of STATCOM

本文选用星形连接方式的直挂式 H 桥, 每相 6 个 IGBT 子模块, 将 VSG 产生的 PWM 信号送给各个 IGBT 子模块, 每个 IGBT 子模块两端电容电压最小值为

$$U_{dc} = \sqrt{2} \frac{u_{sA}}{\sqrt{3} \times 6} \quad (6)$$

每个 IGBT 子模块的工作模式分充电、放电和旁路 3 种。将 H 桥模块并入电网后, 由电网对电容进行充电, 正向时 VT_1 、 VT_2 导通, VT_3 、 VT_4 闭锁; 当电容

充满电后, H 桥模块将对电网进行放电, 正向时轮到输出的子模块 VT_1 、 VT_2 导通, VT_3 、 VT_4 闭锁, 不参与放电的子模块均导通 VT_2 、 VT_4 旁路处理。根据载波移相调制 PWM 信号触发导通各个 IGBT 子模块, 最后将导通的子模块电容两端电压 U_{dc} 叠加输出, 经电抗器输出电压值补偿跌落电压以补偿无功。

1.3 基于新型 VSG 算法的控制策略

在 STATCOM 并网运行后, 图 1 中 VSG 原动机

调速控制便失去了意义,不再适用于并网后 STATCOM 的控制。并且图 1 所示经典 VSG 无功调节只有一相,而当电网电压波动时,可能出现三相

不平衡现象,为了更加精确控制各相电压,本文将无功功率调节设计成 3 相,从而分别控制电网三相电压。基于新型 VSG 算法的控制策略见图 3。

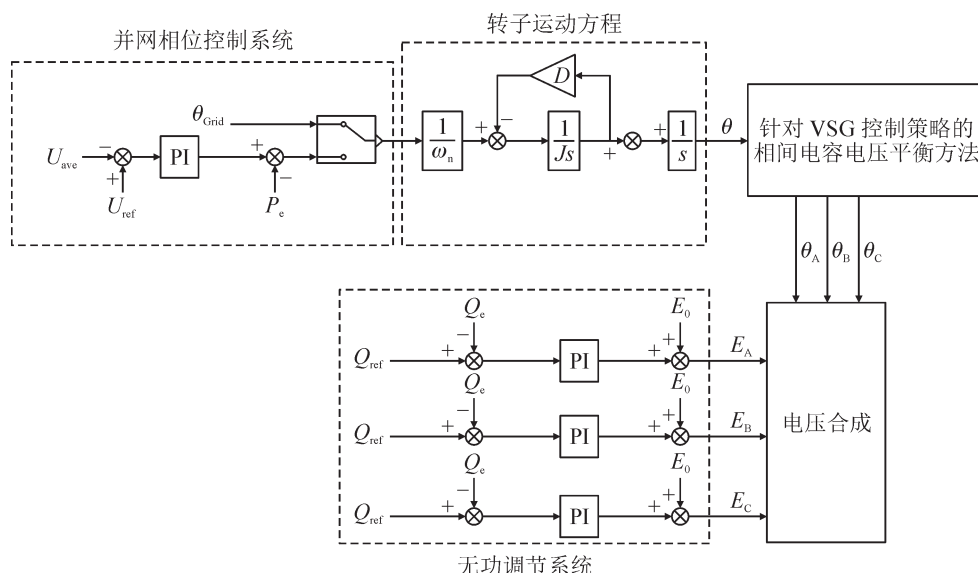


图3 基于新型VSG算法的控制策略
Fig. 3 Control strategy based on new VSG algorithm

并网前通过锁相环得到电网侧相位 θ_{grid} 与频率,并将其设定为 VSG 的初始相位与频率。在 t 时刻并网,并网瞬间切换至 VSG 控制,从而达到快速并网并跟踪电网相位的目的。设定直流侧电容电压参考值为 U_{ref} ,当切换至 VSG 控制时,将参考值 U_{ref} 与三相平均值 U_{ave} 作差, U_{ave} 由式(7)得

$$U_{ave} = \frac{U_{Aave} + U_{Bave} + U_{Cave}}{3} \quad (7)$$

式中, U_{Aave} 、 U_{Bave} 、 U_{Cave} 分别为直流侧各相子模块电容电压的平均值。差值经过 PI 调节得到机械功率 P_m ,与电磁功率 P_e 作差,最后经转子运动方程输出为相角 θ 。

新型 VSG 算法控制策略中无功调节系统是对电网进行分相无功补偿。设定每相指令无功功率参考值为 Q_{ref} ,取电网电压 u_{sA} 、 u_{sB} 、 u_{sC} 和 VSG 输出电流 i_{XdA} 、 i_{XdB} 、 i_{XdC} 经无功功率计算 s 后得到瞬时无功功率 Q_e , Q_{ref} 与 Q_e 比较后经过 PI 调节输出为内电势幅值偏差量 ΔE ,最后输出为虚拟内电势幅值 E_A 、 E_B 、 E_C 。

2 针对VSG控制策略的相间电容电压平衡方法

当 STATCOM 并网工作时,每相子模块工作状态不同,会导致相内、相间电容电压不一致。本文对 STATCOM 采用电容电压排序算法来均衡相内电容电压,每相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。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,从而很好的解决其相内电容电压平衡的问题。

对于相间电容电压的平衡控制策略,本文设计见图 4,将并网控制系统输出的 θ 也分为 3 部分,进行分相调节,从而更精确控制调制电压的相位。

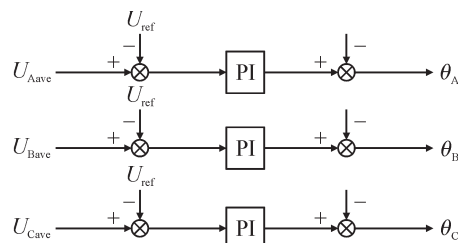


图4 相间电容电压平衡控制策略
Fig. 4 Inter-phase capacitive voltage balance control strategy

首先取各相直流侧电容电压平均值 U_{Aave} 、 U_{Bave} 、 U_{Cave} ,再分别与电压参考值 U_{ref} 作差,得到的差值 ΔU_{Aave} 、 ΔU_{Bave} 、 ΔU_{Cave} 经 PI 调节后输出为相位偏移量 $\Delta \theta_A$ 、 $\Delta \theta_B$ 、 $\Delta \theta_C$,分别与 θ_a 、 θ_b 、 θ_c 比较,最后输出为相角 θ_A 、 θ_B 、 θ_C ,其中 θ_a 、 θ_b 、 θ_c 由并网控制系统得到的 VSG 相位角 θ 计算得到。

$$\begin{cases} \theta_a = \theta \\ \theta_b = \theta - \frac{2}{3}\pi \\ \theta_c = \theta - \frac{4}{3}\pi \end{cases} \quad (8)$$

(9)所示,输出为各相调制电压,从而完成分相调制 PWM 信号。

$$\begin{cases} u_{\text{aout}} = E_A \cos \theta_A \\ u_{\text{bout}} = E_B \cos \theta_B \\ u_{\text{cout}} = E_C \cos \theta_C \end{cases} \quad (9)$$

图 3 所示将无功调节部分输出的电压幅值 E_A 、 E_B 、 E_C 与并网控制系统输出的相位 θ_A 、 θ_B 、 θ_C 合成为三相电压 u_{out} 即为电压合成。相较于经典 VSG 输出的虚拟内电势 E 和相角 θ ,新型 VSG 控制策略经电压合成后得到的 u_{aout} 、 u_{bout} 、 u_{cout} 可以对电网三相进行分相控制,更加精确。最后进行电压合成如式

因此适用于相间电容电压平衡的基于新型 VSG 算法的整体控制框图见图 5。输出的 u_{aout} 、 u_{bout} 、 u_{cout} 为 PWM 信号调制波的电压参考向量,调制后输出的 PWM 信号送到 STATCOM 的各相各个 IGBT 子模块,控制其导通关断。

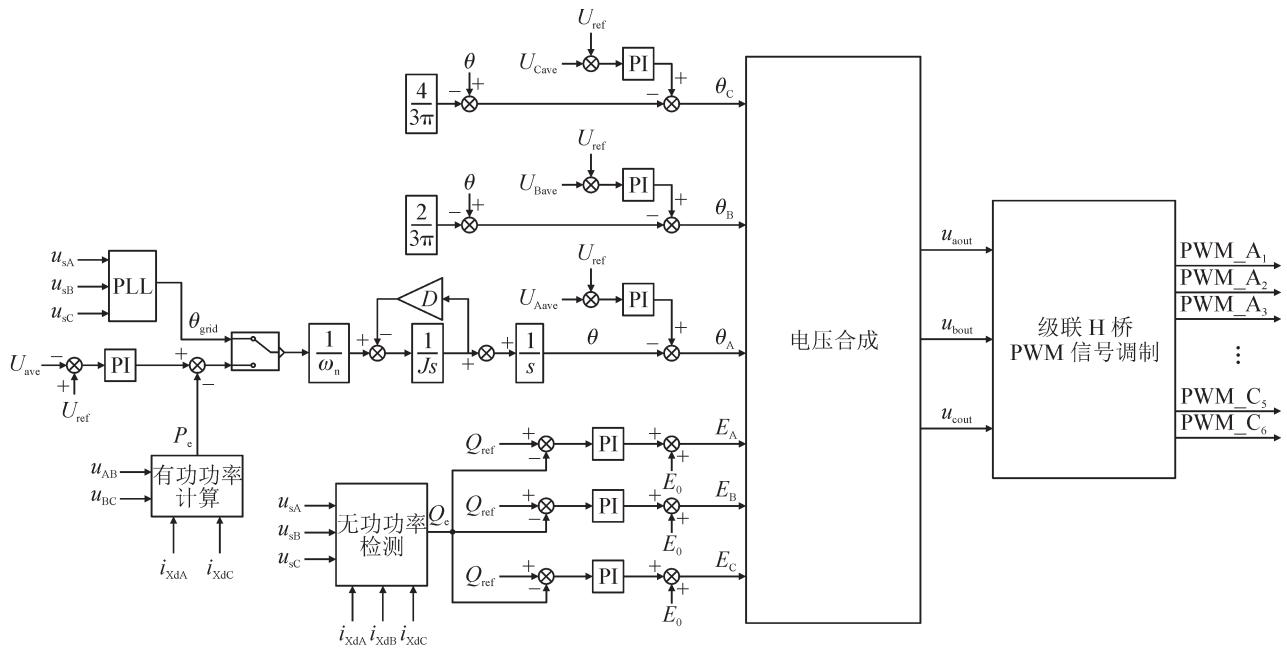


图 5 整体控制框图
Fig. 5 Overall control block diagram

3 仿真分析

3.1 仿真模型搭建

为验证本文所提的基于 VSG 的电容相间电压平衡控制策略的可行性,本节基于 Matlab/Simulink 仿真平台,根据图 2 所示 STATCOM 主电路拓扑,搭建基于六模块十三电平级联 H 桥变换器的静止同步补偿器模型,并进行低压仿真验证,仿真参数见表 1。

根据上述的仿真参数,搭建对应的仿真模型后,为深入验证该分相电流控制策略对相间电容电压控制的有效性,分别进行定无功输出电容电压启动响应;电网电压波动电容电压及补偿电流响应及电容电压指令阶跃响应。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数	数值
电网线电压幅值/kV	10
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	2 200
并网电抗器等效电感/mH	4
线路等效电阻/m Ω	10
电容电压参考值/V	1 500/2 000
VSG 惯性常数/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	10
VSG 阻尼系数/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)	0.000 5
子模块开关器件频率/Hz	4 000

3.2 稳态输出电容电压启动响应

当电网处于稳态时,并入 STATCOM 设备,STATCOM 三相 15 个电容型子模块电容电压波形

见图6, 0~0.05 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, 0.05 s 后控制算法投入, 在约 0.65 s 时, 电容电压稳定在电容电压指令值 1 500 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。

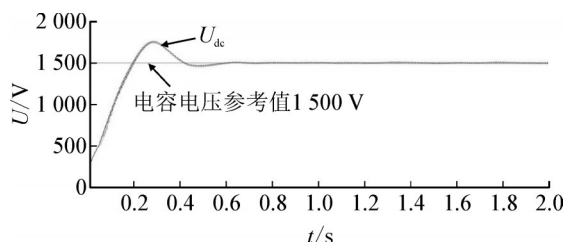


图6 稳态输出STATCOM电容电压波形
Fig. 6 Steady state output STATCOM capacitive voltage waveform

图7所示为电容电压稳定后 0.65~1.25 s 的波形放大, 可以看到其波动幅度在 8 V 左右, 在波动允许范围内。

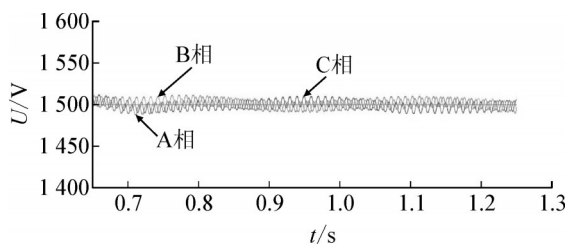


图7 稳态输出STATCOM电容电压放大波形
Fig. 7 Stable output STATCOM capacitive voltage amplification waveform

待电容电压稳定后, STATCOM 输出补偿电流见图8, 可见 STATCOM 输出的补偿电流具有良好的三相对称性。

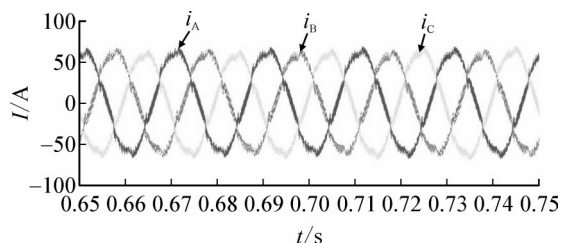


图8 稳态输出STATCOM补偿电流波形
Fig. 8 Steady state output STATCOM compensation current waveform

为验证本文所提相间电容电压平衡控制策略的有效性, 仿真对比了相同参数条件下, 经典 VSG 控制策略投入的电容电压波形, 见图9~10。

图10所示为电容电压稳定后 0.65~1.15 s 的波形放大, 可以看到经典 VSG 控制策略并未平衡相间电容电压, 其波形是发散的。

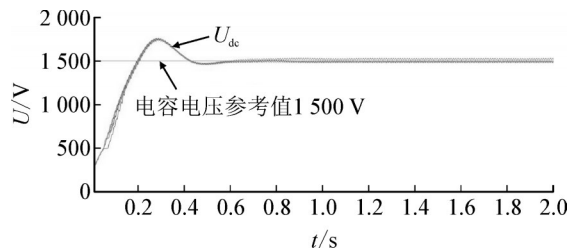


图9 经典VSG控制策略投入电容电压波形
Fig. 9 Input capacitive voltage waveform of traditional VSG control strategy

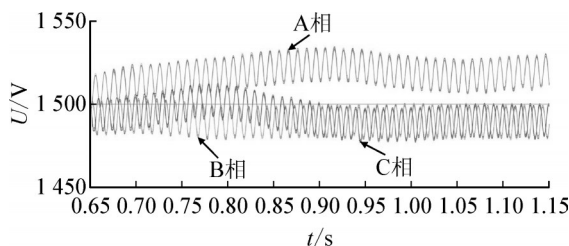
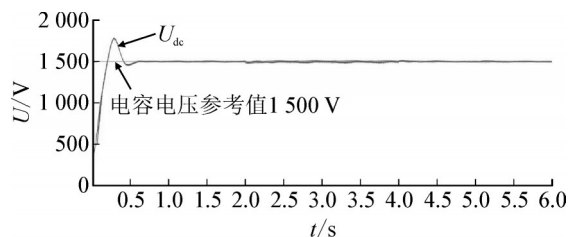


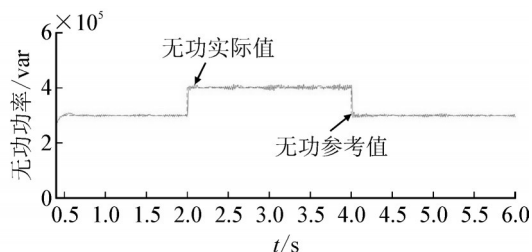
图10 经典VSG控制策略投入电容电压波形
Fig. 10 Input capacitive voltage waveform of traditional VSG control strategy

3.3 无功指令阶跃电容电压及无功功率响应

在 STATCOM 子模块电容电压达到稳态后, 在 2~4 s 内设定无功功率升高 100 kvar, 其电容电压及无功功率波形图如图11所示, 由图11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 1 500 V, 当减小输出无功功率, 经过 0.2 s 左右的暂态时间后, 电容电压保持一致, 且稳定在指令值。无功功率指令阶跃时, 由图11可见, 无功功率也快速的跟踪着无功参考值, 具有良好的响应特性。



(a) 电容电压波形



(b) 无功功率波形

图11 无功功率阶跃电容电压及无功功率波形
Fig. 11 Reactive power step capacitive voltage and reactive power waveform

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的相间电容电

压响应动态特性,在电网电压稳定的条件下,待电容电压稳定在 1 500 V 后,在 2 s 时,令电容电压指令值阶跃值 2 000 V;在 4 s 时电容电压指令值恢复为 1 500 V,STATCOM 子模块电容电压波形图见图 12,由图 12 可见,当电容电压指令值阶跃后,电容电压在 2.55 s 左右达到 2 000 V 的指令值,且三相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 1 500 V 时,电容电压响应迅速,经 0.5 s 后,电容电压降至指令电压,三相电容电压依旧保持良好的一致性,表明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。

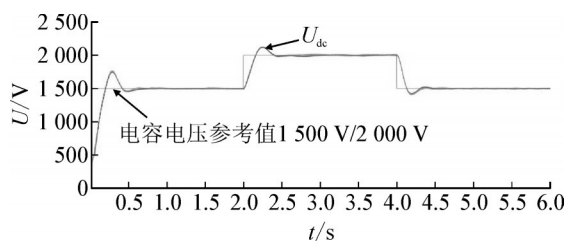
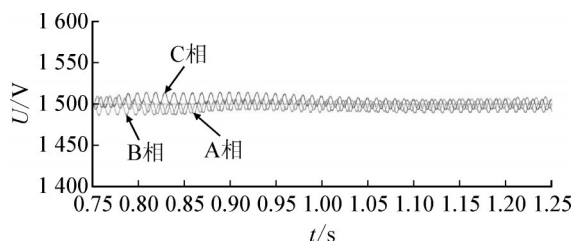


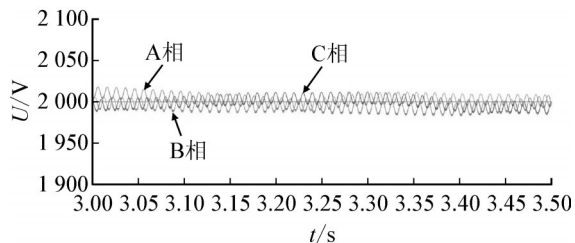
图 12 指令电容电压阶跃电容电压波形

Fig. 12 Command capacitive voltage and step capacitive voltage waveform

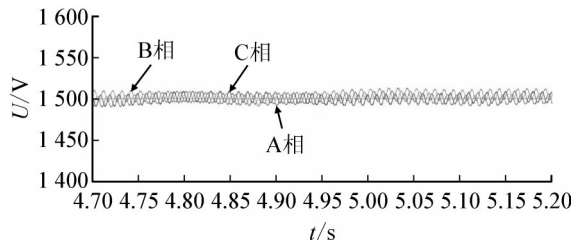
图 13 所示为电容电压稳定后 3 段波形的放大,可以看到其三相电容电压一致性良好。



(a) 0.75~1.25 s 电容电压波形



(b) 2.7~3.2 s 电容电压波形



(c) 4.7~5.2 s 电容电压波形

图 13 输出电容电压波形

Fig. 13 Output capacitive voltage waveform

4 结语

本文针对 STATCOM 相间电容电压不平衡问题提出了一种基于 VSG 的相角控制策略,仿真结果表明本文所提控制策略有效解决了采用经典 VSG 控制策略所存在的相间电容电压不平衡问题。

本文所提新型 VSG 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,对于经典 VSG 控制下发散的相间电容电压,投入该控制算法后,可以实现相间电容电压收敛,具有良好的控制效果和动态响应特性。

在本文所提控制策略中,并网控制系统中实现了 STATCOM 的快速并网,且控制策略结构简洁,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。

参考文献

- [1] 张海川,王顺亮,刘天琪,等.考虑交直流多谐波耦合的模块化多电平换流器矩阵建模[J].电测与仪表,2022,59(5):102-108.
ZHANG Haichuan, WANG Shunliang, LIU Tianqi, et al. Matrix modeling of modular multilevel converter considering multi-harmonic coupling of AC and DC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5):102-108.
- [2] 刘凤君.现代逆变技术及应用[M].北京:电子工业出版社,2006:425-426.
- [3] 张旭峰.三相级联电力电子变压器中间直流电容电压均衡控制研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [4] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine[C]// IEEE General Meeting Power & Energy Society. [S.l.]:IEEE, 2007:1-6.
- [5] J. DRIESEN, K. VISSCHER. Virtual synchronous generators[C]// IEEE General Meeting Power & Energy Society. [S.l.]:IEEE, 2008. 1-3.
- [6] TOM LOIX, SVEN DE BREUCKER, PIET VANASSCHE, et al. Layout and performance of the power electronic converter platform for the VSYNC project[C]//2009 IEEE Bucharest Power Tech. [S.l.]:IEEE, 2009. 1-8.
- [7] VAN T V, VISSCHER K, DIAZ J, et al. Virtual synchronous generator: An element of future grids[C]//2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). [S.l.]:IEEE, 2010:1-7.
- [8] 胡文强,吴在军,孙充勃,等.基于 VSG 的储能系统并网逆变器建模与参数整定方法[J].电力自动化设备,2018,38(8):13-23.
HU Wenqiang, WU Zaijun, SUN Chongbo, et al. Modeling and parameter setting method for grid-connected inverter of energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Au-

- tomation Equipment, 2018, 38(8):13-23.
- [9] 李琰,王岩,高峰,等. 光伏电站与VSC-HVDC无通信虚拟同步机协调控制策略[J]. 现代电力, 2017, 34(5):74-81.
- LI Yan, WANG Yan, GAO Feng, et al. The coordinated control strategy for virtual synchronous generator of PV stations and VSC-HVDC without communication[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(5):74-81.
- [10] 刘东奇,钟庆昌,王耀南,等. 基于同步逆变器的电动汽车V2G智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):544-556.
- LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):544-556.
- [11] 陶银正,蒲道杰,毛福斌. 虚拟同步发电机技术及其在光储微电网中的应用[J]. 电气技术, 2016(11):36-40.
- TAO Yinzheng, PU Daojie, MAO Fubin. Virtual synchronous generator technology and its application in optical storage microgrid[J]. Electrical Engineering, 2016(11):36-40.
- [12] 李圣清,杨潇. 改进的级联SVG直流侧均压控制策略[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(3):13-17.
- LI Shengqing, YANG Xiao. Improved DC side voltage sharing control strategy of cascaded SVG[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(3):13-17.
- [13] 王中武,李俊,王珂. 级联SVG直流侧均压控制的研究[J]. 电子器件, 2018, 41(3):638-643.
- WANG Zhongwu, LI Jun, WANG Ke. Research on DC side voltage sharing control of cascaded SVG[J]. Electronic Devices, 2018, 41(3):638-643.
- [14] 王珂,李俊. 级联型有源滤波器均压控制方法的研究[J]. 电子器件, 2018, 41(3):657-661.
- WANG Ke, LI Jun. Research on voltage equalization control method of cascaded active power filter[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(3):657-661.
- [15] 黄海宏,王超,王海欣. 网压不对称H桥级联APF直流侧电压的控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11):37-45.
- HUANG Haihong, WANG Chao, WANG Haixin. DC voltage control strategy of cascaded H-bridge APF with unbalanced grid voltage[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(11):37-45.
- [16] 马灿,夏玲芳,高瑞峰,等. 电网不平衡下星形级联SVG负序电压控制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5):14-18.
- MA Can, XIA Lingfang, GAO Ruifeng, et al. Negative sequence voltage control of star cascade SVG under power grid imbalance[J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(5):14-18.
- [17] 陈继开,胡阳,李浩茹,等. 级联H桥SVG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. Analysis and control strategy of DC voltage imbalance of cascaded H-bridge SVG[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3):36-43.
- [18] 吴小丹,朱海勇,董云龙,等. 面向柔性低频输电的模块化多电平矩阵变换器分频分层控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18):131-140.
- WU Xiaodan, ZHU Haiyong, DONG Yunlong, et al. Frequency-division and hierarchical control of modular multi-level matrix converter for flexible low-frequency transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18):131-140.
- [19] 李雨萍. 基于链式H桥的SVG在三相电压不平衡时的直流侧电压控制策略研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2017, 37(6):358-361.
- LI Liping. Research on DC side voltage control strategy based on cascade H-bridge SVG under the condition of unbalanced three-phase voltage[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology(Natural Science Edition), 2017, 37(6):358-361.
- [20] 刘安灵,张彬,梁昊,等. Y形链式SVG的相间电容电压平衡控制策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12):32-38.
- LIU Anling, ZHANG Bin, LIANG Hao, et al. Research on inter phase capacitor voltage balance control strategy of Y-chain SVG[J]. Smart Power, 2017, 45(12):32-38.
- [21] 许中,许崇福,王劲,等. 一种高压链式负序电流发生装置及其控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2):34-39.
- XU Zhong, XU Chongfu, WANG Jin, et al. A high-voltage cascade negative-sequence current generator and its control strategy[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2):34-39.

作者简介:

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。

刘惠康(1963—),男,教授,研究方向为智能控制、新型电气传动方向的研究。E-mail:liuhuikang@wust.edu.cn。

柴琳(1979—),男,副教授,通信作者,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。

陈天宇(1992—),男,讲师,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。