DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.135 **中图分类号**：TM501+.1 **文献标志码**：A

电容取能方式无功补偿动态稳压调制技术研究

史宇昊[1]，胡康涛[2]，陈小军[2]，陈 韬[2]，杨兰均[1]
(1.西安交通大学电气工程学院电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049；2.广东省智能电网新技术企业重点实验室(南方电网电力科技股份有限公司)，广州 510080)

摘要：电容取能方式因其取能功率稳定、成本低等优势，适合应用于中压配电网柱上开关的就地供电场景。电容取能电路输出特性处于近似恒流源区间，同时要求一次电压在不同工况下5.7~42.0 kV的范围内均可正常供电，因此必须采取电压调控措施为负载提供稳定电压。从电容取能方式补偿特性出发，提出利用二次无功补偿方式弥补取能功率与负载消耗之间的差额；并提出基于脉宽调制PWM(pulse width modulation)的电压调制动态无功补偿方案，通过动态等效电抗实现动态无功补偿；构建基于正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation)的波形调制动态无功补偿方案，通过第三绕组H桥主动调控变压器电压波形，实现电容取能方式的无功动态稳压。通过上述稳压调控方案，实现电容取能方式低发热下的稳定交流电压输出。

关键词：电容取能；稳压输出；无功补偿；动态调控

Research on Capacitive Energy Extraction Mode, Reactive Power Compensation and Dynamic Voltage Regulation Modulation Technology

SHI Yuhao[1], HU Kangtao[2], CHEN Xiaojun[2], CHEN Tao[2], YANG Lanjun[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of New Technology for Smart Grid, China Southern Power Grid Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Due to its advantages of stable power and low cost, the capacitive energy extraction mode is suitable for local power supply scenarios of pole switches in medium-voltage distribution networks. The output characteristics of a capacitive energy extraction circuit are often in an approximate constant-current source range, and the primary voltage is required to normally supply power in the range of 5.7–42 kV under different operating conditions in the meantime, so voltage regulation measures must be taken to provide stable voltage for the load. First, based on the compensation characteristics in the capacitive energy extraction mode, a secondary reactive power compensation mode is proposed to make up for the difference between the energy extraction power and load consumption. Second, a voltage modulation dynamic reactive power compensation scheme based on PWM is put forward, so that the dynamic reactive compensation is realized through dynamic equivalent reactance. Third, a waveform modulation dynamic reactive power compensation scheme is constructed, and the transformer voltage waveform is actively controlled through the H-bridge of the third winding, thus realizing the reactive power dynamic voltage stabilization in the capacitive energy extraction mode. Under the proposed voltage stabilization and regulation scheme, the stable AC voltage output under low heat generation in the capacitive energy extraction mode is realized.

Keywords: Capacitive energy extraction; stable voltage output; reactive power compensation; dynamic control

收稿日期：2024-08-26；**修回日期**：2024-10-14，2024-11-15；
录用日期：2024-11-29；**网络首发日期**：2024-12-23
基金项目：广东省智能电网新技术企业重点实验室资助项目(2020B1212070025)
This work is supported by Guangdong Provincial Key Laboratory of New Technology for Smart Grid under the grant 2020 B1212070025

随着配电网电力设备数字化水平的不断提高，在线监测、边缘计算、数据汇集、自动操作机构等设备不断融入配电网，智能设备对就地取能电源的需求不断增长，对取能电压的取能容量需求也不断增大[1-6]。电容限流取能装置通过高压电容器将高压小电流转换为低压大电流进行就地供电[7-9]，具有体积小、成本低等优势。随着负载需求的不断增长，为在有限的一次取能电流下尽可能多地获得输出功率，除了提高变压器一次电压外，还可使电容取能装置处于完全补偿状态，此时电容限流取能装置具有最高取能容量，输出特性近似为恒流源。一次电压在不同工况下的工作范围可达数倍差额(如 10 kV 取电装置在正常运行、接地故障、局部放电测试、耐压测试等不同工况下一次电压范围为 5.7~42.0 kV)；除一次电压外，负载大小也直接影响着电容限流取能装置输出与输入功率的差额。若不加以调制，该差额将导致电容限流取能装置输出电压超出需求值[10-12]。此外，目前电容限流取能产品为临时满足局部放电测试要求，在 2 倍额定电压以上范围内选择对取电装置进行短路保护，使得电容限流取能装置在一次电压较高时停止供电。因此，为使电容限流取能装置工作电压稳定、满足负载稳压供电的需求，不同工况下保持装置功率流平衡、保持稳定供电的稳压调制技术成为电容限流取能装置稳定工作的关键。

为实现全范围内的输出稳定，文献[13]较早进行了电容取电方式的特性研究及样机设计，采用了多路开关管投切多路泄放电阻方式对电容取能装置进行稳压，初步实现了电容取能装置的恒压输出，但由于调制精细度不足，补充了开关电源进行二次稳压，并且电阻持续投入将产生发热，影响装置工作、产生能量浪费；文献[14]提出了 1 种能耗型保护电路与电容降压型保护电路，能耗型保护电路是在负载前端增加三极管、稳压管与泄放电阻以保持直流电压稳定，电容降压型保护电路通过在变压器二次侧增加可投切的电容，调整取能电路分压以匹配取能功率，能耗型保护电路同样导致取能装置发热，电容降压型保护电路仅能进行部分能量泄放，仍需要配合能耗保护电路进行稳压；文献[15]在负载前直流电路部分增加晶闸管及其驱动电路，在直流侧电压超过设定值后驱动晶闸管投入，使得直流部分暂时短路，在交流电流过零后恢复，这一策略避免了投切电阻导致的装置发热，但为装置引入了大量高次谐波，交流输出波形畸变严重，使得装置局部放电测量超标。现有研究实现了电容限流取能装置的恒定电压输出，但仍存在调制精度较差、输出波形畸变、装置发热导致取能浪费等问题，同时也无法做到在一次电压全范围内保持输出。

鉴于上述问题，本文针对电容限流取能装置稳压调控问题，研究无功调制取能功率的理论基础，论证通过无功补偿调制电容限流取能功率的可行性；提出基于脉宽调制 PWM(pulse width modulation)的动态无功补偿方案，验证等效电感对取能装置功率的动态调控作用；进一步提出基于正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal pulse width modulation)的移相逆变无功补偿方案，对电容取能装置中变压器二次波形进行动态稳压调制，以降低电容限流取能装置发热，稳定输出交流正弦电压，对输出电压进行高精度调制。

1 取能功率无功调制理论基础

电容取能方式是由高压臂电容、低压臂电容串联后接至线路与地之间，通过在低压臂电容上增加小型高压变压器，将一次侧的高压小电流转换为变压器二次侧的低压大电流[16-17]，从而进一步为负载提供能量，其等效原理如图 1 所示。图中：U_S 为系统电压；C_1、C_2 分别为高压臂、低压臂电容；r_1、r_2 分别为变压器一、二次漏阻；L_M 为变压器励磁电感；R_L 为负载等效电阻。

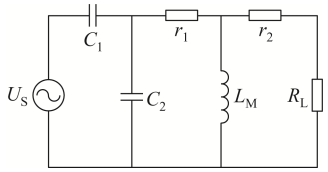


图 1 电容取能方式等效原理

Fig. 1 Schematic of equivalence of capacitive energy extraction mode

由于高低压臂、变压器之间存在补偿关系，记补偿系数 $a=\omega^2 L_{\mathrm{M}}(C_1+C_2)$，$\omega$ 为角频率，不同的补偿系数会影响电源特性、输出功率。根据文献[18]计算，全补偿状态下电源特性为恒流源，同时输出功率达到最大；相较于全补偿状态，欠补偿和过补偿状态均降低了输出功率，电源特性的恒流性质减弱，恒压性质增强。电容取能方式的输出功率计算式为

$$P\approx\frac{\omega^2 C_1^2 U_{\mathrm{S}}^2}{\dfrac{1}{R_{\mathrm{L}}}+\omega^2\left(1-\dfrac{1}{a}\right)^2(C_1+C_2)^2 R_{\mathrm{L}}} \tag{1}$$

因此，通过调整电容取能方式的补偿系数，可以改变电容取能方式的输出功率。对于实际电容取能电路，其高低压臂电容通常为固定值的高压电容，其容值通常难以调整，小型高压变压器也同样不便于调整励磁电抗，因此，在变压器二次侧通过电力电子元件动态产生 1 个无功负载，可以改变二次侧等效负载性质，既可以影响补偿系统以调整输出功率，又便于实时动态调节。

2　基于 PWM 的动态无功补偿方案

对变压器二次等效负载进行动态调整时，必须保持负载电压稳定。可以通过实时调节变压器二次侧电流有效值，使得负载电压稳定在额定值时保持变压器一、二次电流折算值平衡。本文提出以下调制方案：在变压器二次侧并联感性负载，通过 H 桥对电感进行 PWM 双向循环调制，对取能电流进行分流，进而实现对负载的动态交流稳压。基于 PWM 的动态无功补偿方案原理如图 2 所示。

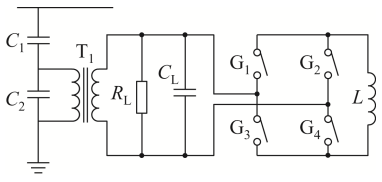


图 2　基于 PWM 的动态无功补偿方案原理

Fig. 2 Schematic of dynamic reactive power compensation scheme based on PWM

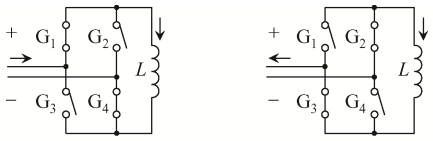
图 2 中：T_1 为变压器；C_{L} 为滤波电容；L 为调制电感；G_1 为左上桥臂；G_2 为右上桥臂；G_3 为左下桥臂；G_4 为右下桥臂。设计工作模式：G_1 与 G_4 为第一导通组，G_2 与 G_3 为第二导通组。当第一导通组以占空比 D 进行导通关断时，第二导通组在相反区间以占空比 $1-D$ 进行导通，2 个导通组之间设定一定导通死区。以 $D>0.5$ 为例，负载电压极性为上正下负，其工作过程分析如下。

(1)负载电压为正时，G_1、G_4 闭合，G_2、G_3 断开，电流流经 G_1、L、G_4，电感电流正向增大，直至电压过零点，如图 3(a)所示；

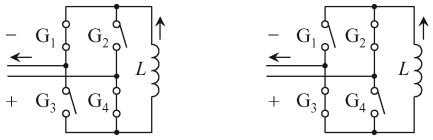
(2)负载电压为正时，G_1、G_4 断开，G_2、G_3 闭合，电流流经 G_2、L、G_3，电感电流正向减小，直至电压过零点，如图 3(b)所示；

(3)负载电压为负时，G_1、G_4 闭合，G_2、G_3 断开，电流流经 G_1、L、G_4，电感电流负向增大，直至电压过零点，如图 3(c)所示；

(4)负载电压为负时，G_1、G_4 断开，G_2、G_3 闭合，电流流经 G_2、L、G_3，电感电流负向减小，直至电压过零点，如图 3(d)所示。



(a) 电压正向，G_1、G_4闭合　(b) 电压正向，G_2、G_3闭合



(c) 电压负向，G_1、G_4闭合　(d) 电压负向，G_2、G_3闭合

图 3　基于 PWM 的动态无功补偿方案工作过程

Fig. 3 Working process of dynamic reactive power compensation scheme based on PWM

该过程中，阶段 1 电感充电电流为

$$i_1=\frac{Du}{2\pi fL} \tag{2}$$

式中：u 为负载电压；f 为频率。

阶段 2 电感放电电流为

$$i_2=\frac{(1-D)u}{2\pi fL} \tag{3}$$

单个开关周期中，电感中的电流为

$$i_1 - i_2 = \frac{(2D-1)u}{2\pi fL} \tag{4}$$

该过程中的等效电感为

$$L_{eq} = \frac{1}{2D-1}L \tag{5}$$

阶段 3、阶段 4 情况同上。该拓扑能够通过调节占空比，实现等效电感的连续调节，设定第一、第二导通组占空比分别为 0.5 即可等效为开路，设定占空比为 1 时等效为总电感，因此能够覆盖的动态电感调节范围为 L~∞。

为验证该方法的可行性，通过 MATLAB/Simulink 对电容限流取能电路及基于 PWM 的动态无功补偿电路进行仿真，搭建恒定电压源、高压臂电容、低压臂电容、变压器、负载、感性动态无功补偿电路及其 PI 控制回路，设计 PI 控制目标为负载电压有效值，参考值为 220 V；检测负载电压有效值与参考值偏差，并将偏差正负归一化至 0~0.5 区间，以加速收敛方式控制 H 桥 2 个导通组的占空比。其仿真参数见表 1。

表 1 基于 H 桥的感性无功动态补偿仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of inductive reactive power dynamic compensation based on H-bridge

参数	数值
U_S/V	5 770
ω/rad^{-1}	100π
C_1/nF	5
u/V	220
R_L/kΩ	5~500

按照实际工况的 3 种典型情况进行仿真：负载骤增、负载骤减及一次电压异常升高。基于 PWM 的动态无功补偿方案仿真如图 4 所示。负载骤增情况是在取能电路稳定的情况下，负载由 0.1 W 瞬时增大至 10.0 W；负载骤减情况是在取能电路稳定的情况下，负载由 10.0 W 瞬时降低至 0.1 W；一次电压异常升高是在取能电路稳定、负载 0.1 W 情况下，一次电压升高至额定值的 1.9 倍。在各种情况下，负载电压波形及有效值如图 5 所示，图中：U_{rms} 为负载电压有效值；U_R 为负载电压。

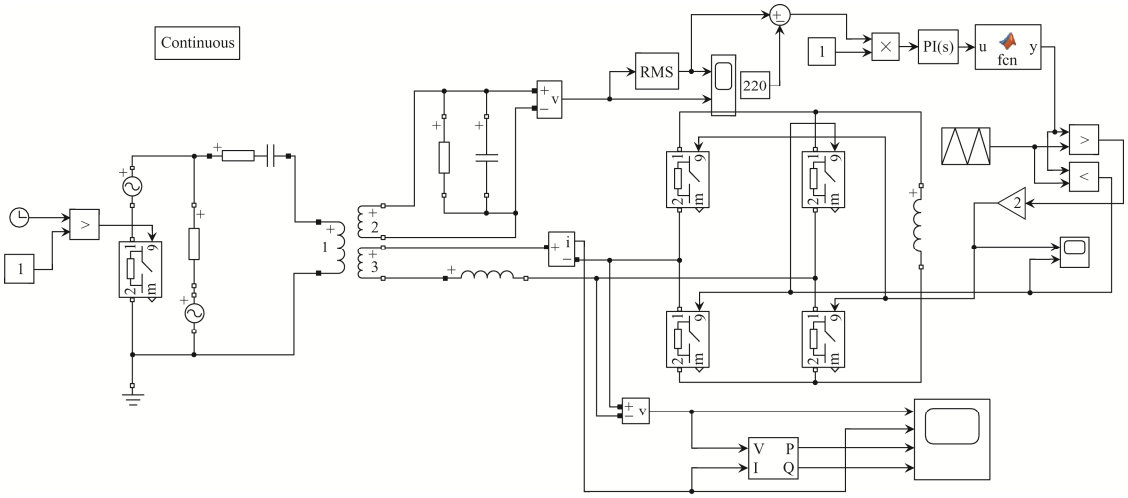


图 4 基于 PWM 的动态无功补偿方案仿真

Fig. 4 Simulation of dynamic reactive power compensation scheme based on PWM

负载骤增时，负载电压有效值瞬时降低至约 200 V，在 0.5 s 后升高至约 220 V(±0.5%)；负载骤减时，负载电压有效值瞬时升高至约 240 V，在 0.8~1.0 s 后恢复至约 220 V；一次电压异常升高时，负载电压有效值瞬时升高至约 260 V，在约 0.8 s 后降低至 220 V。因此，在 3 种典型实际工况中，该无功动态补偿方式可以在 0.5~1.0 s 内稳定负载交流电压。

由此，基于 PWM 的动态无功补偿方案通过动态调整 2 个导通组开关的占空比，可以实现等效电感由器件的电感到完全开路区间的连续变化。以负载交流电压有效值为控制目标，动态调整等效电

感，可以实现电容限流取能电路的交流动态稳压。

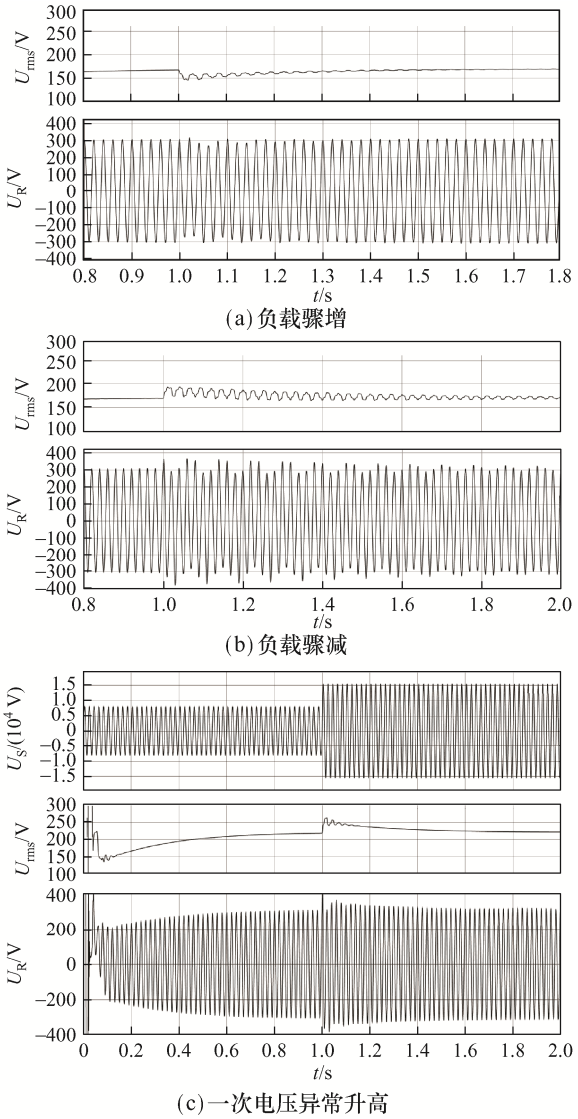


图 5　负载及一次电压突变时负载电压波形及有效值

Fig. 5 Load voltage waveform and effective value under sudden changes in load and primary voltage

3　基于 SPWM 的移相逆变无功补偿方案

为提高负载电压波形稳定性，提出基于 SPWM 的移相逆变无功补偿方案，如图 6 所示。考虑到隔离及滤波问题，在变压器二次侧新增调控绕组，经滤波电感接逆变桥及直流电容，逆变桥使得变压器调控绕组等效电压波形为正弦波，通过检测等效正弦波与调控绕组电流的相位差，对正弦波相位进行动态调整，调控绕组通过吸收或输出无功使得负载电压稳定。

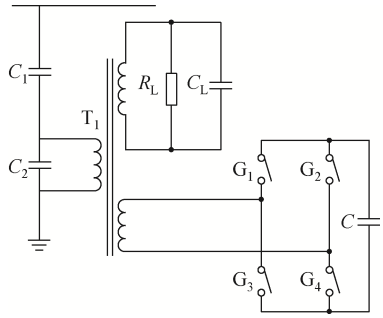


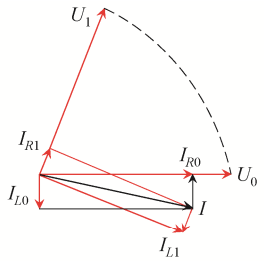
图 6　基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案示意

Fig. 6 Schematic of waveform modulation dynamic reactive power compensation scheme based on SPWM

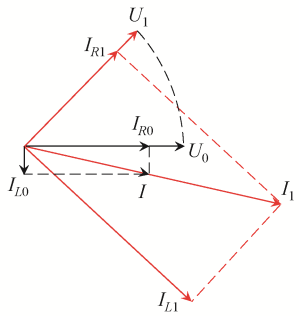
该动态调制过程中，同样地，G_1 与 G_4 为第一导通组，G_2 与 G_3 为第二导通组。与第 2 节补偿方案不同的是，在每个周期中，2 个导通组的占空比按照 SPWM 输出，并且保持不变。G_1 与 G_4 占空比高于 0.5 时，瞬时等效输出电压为正；G_2 与 G_3 占空比高于 0.5 时，瞬时等效输出电压为负。整个周期中，G_1 与 G_4 导通组的占空比由 0~1 变化，最终得到等效正弦波。以调控绕组等效电压波形超前电流为例，调控负载表现为感性，当检测到负载电压低于标准值时，则对当前占空比进行暂时保持，保持时长与相位差大小有关；随后继续进行正常 SPWM 输出，以实现电压波形的滞后增强，降低调控绕组的感性电流；当检测到负载电压高于标准值，则跳过后续一定时长的波形输出，该跳过时长同样与相位差大小有关，以实现电压波形的超前增强，增大调控绕组的感性电流。通过不断调控，直至负载电压有效值达到标准值为止。

以负载骤减、一次电压异常升高为例，分析调控过程，其相位关系如图 7 所示。图中：U_0 为变压器励磁电压；U_1 为变化后的变压器励磁电压；I_{R0} 为原负载电流；I_{R1} 为变化后的负载电流；I_{L0} 为调控绕组电流；I_{L1} 为变化后的调控绕组电流；I 为变压器二次输出总电流；I_1 为变化后的变压器二次输出总电流。在负载骤减后，由于变压器二次输出总电流幅值及相位不变，调控绕组电流骤增，调控绕组逆变输出电压有效值不变，需迅速使电压相位超

前，保持调控绕组功率成分为无功；一次电压异常升高后，变压器二次输出总电流增大，调控绕组电流骤增，调控绕组逆变输出电压有效值不变，同样需迅速使电压相位超前。



(a) 负载骤减过程相位变化关系



(b) 一次电压异常升高过程相位变化关系

图 7 基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿过程相位变化关系

Fig. 7 Phase variation relationship during waveform modulation dynamic reactive power compensation process based on SPWM

同样按照实际工况的负载骤增、负载骤减及一次电压异常升高 3 种情况进行仿真，仿真条件与第 2 节相同，仿真电路如图 8 所示，仿真中负载电压波形及其有效值变化如图 9 所示。

负载骤增时，负载电压有效值瞬时降低至约 210 V，在 1.2 s 后升高至约 220 V(±0.5%)；负载骤减时，负载电压有效值瞬时升高至约 230 V，在 2.0 s 后恢复至约 220 V；一次电压异常升高时，负载电压有效值瞬时升高至约 223 V，在约 2.0 s 后降低至 220 V。

因此，基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案通过调控绕组主动调控负载电压波形，基于负载电压有效值实时动态调控逆变电压的相位，实现调控绕组的无功补偿，进一步实现负载的正弦稳压。

2 种无功动态补偿方案对比见表 2。基于 PWM 的动态无功补偿方案的动态调整时间较短，能够在 1.0 s 内完成负载电压有效值的恢复，但调制过程会出现波形振荡，电压偏移范围在 9%~16%，但所需器件较少，设备成本较低；基于 SPWM 的移相逆变无功补偿方案的调整时间更长，通常需要 1.0~2.0 s 完成负载电压有效值的恢复，但调整过程波形无明显振荡，电压偏移控制在 5%以内，需要变

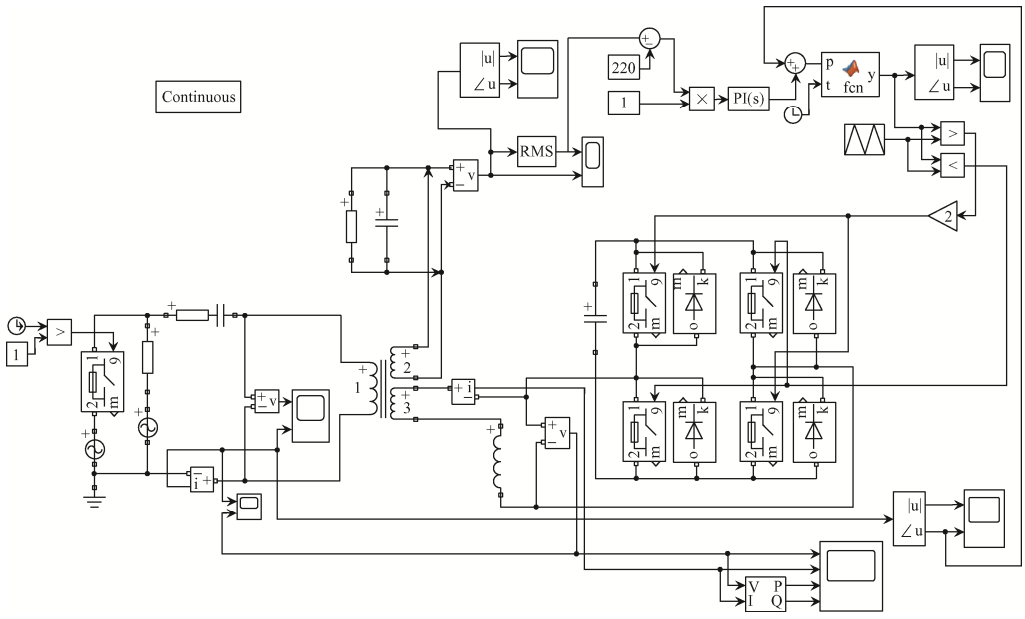
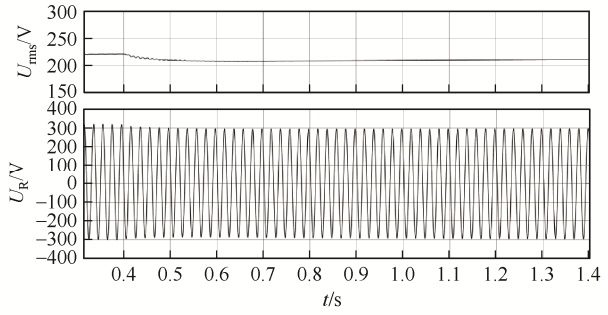
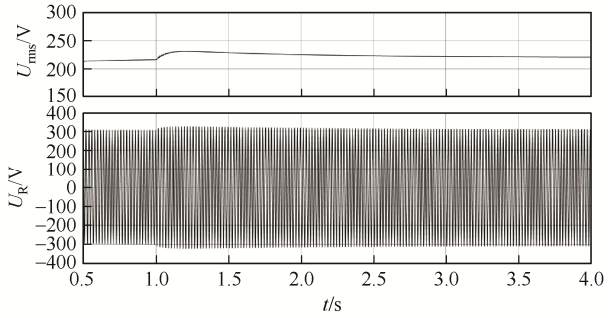


图 8 基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案示意

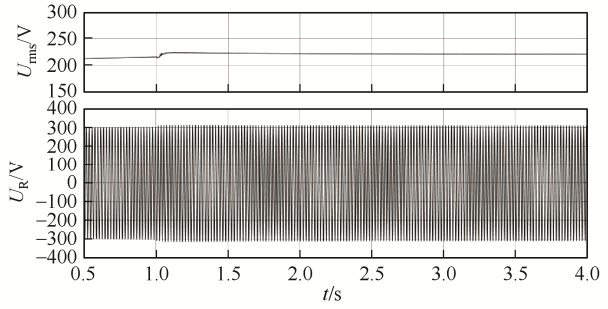
Fig. 8 Schematic of waveform modulation dynamic reactive power compensation scheme based on SPWM



(a) 负载骤增



(b) 负载骤减



(c) 一次电压异常升高

图 9　负载及一次电压变化时负载电压波形及有效值

Fig. 9 Load voltage waveform and effective value under changes in load and primary voltage

表 2　无功动态补偿方案对比

Tab. 2 Comparison between different dynamic reactive power compensation schemes

对比项	工况	基于 PWM 的动态无功补偿方案	基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案
调整时间/s	负载骤增	0.5	1.2
	负载骤减	0.8	2.0
	一次电压异常升高	0.8	2.0
电压偏移率/%	负载骤增	9.1	4.5
	负载骤减	9.1	4.5
	一次电压异常升高	16.0	1.4

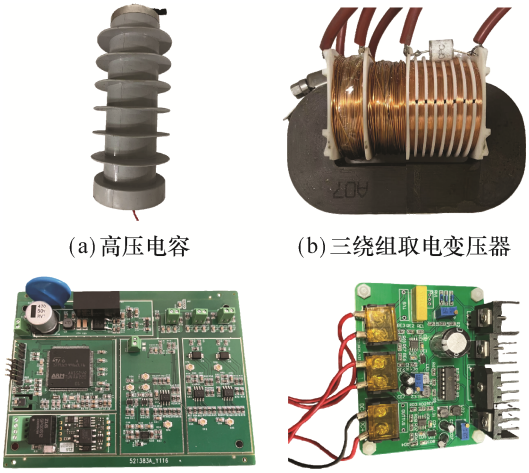
压器设计调控绕组，并且需要较大容量的直流侧电容，成本相对较高。在取能电源成本敏感的应用场景下，基于 PWM 的动态无功补偿方案能够满足通常负载的供电需求；对于供电电压波形质量要求较高的负载，需要牺牲一定成本采用基于 SPWM 的移相逆变无功补偿方案。

4　样机制作与实验测试

考虑到实际装置对电压偏移要求在±10%以内，选择基于 SPWM 的移相逆变无功补偿方案进行样机设计与测试。样机的实现方案包括电容取能主回路、调控驱动模块 2 个部分。

电容取能主回路包括高压电容、三绕组变压器、输出滤波电路。其中，高压电容采用 4 nF 高压陶瓷电容，额定工作电压为 12 kV；自行设计三绕组变压器，采用 CD 型硅钢构成变压器铁心，型号为 23SQG090，截面积为 676 mm^2；设计相应的变压器骨架外观，利用 3D 打印成形；变压器三绕组分别采用直径 0.07、0.70 和 0.70 mm 的漆包线绕制。调控驱动模块包括采集及计算部分、驱动部分，采集及计算部分包括 MCU 及其外围电路、电流电压采集电路。MCU 采用 STM32F446；电流采集电路包括工频电流采样、放大电路及模数转换电路；电压采集电路包括双极性电压隔离采样芯片、放大电路及模数转换电路。驱动部分包括驱动信号芯片、驱动放大芯片、隔离驱动器及外围电路。高压电容、自制的三绕组取电变压器、采集及计算部分电路、驱动部分电路如图10所示。

为进行装置功能测试，搭建了工频高压测试平台，平台由调压器和升压变压器组成。调压器将交流 220 V 转换为可调的 0~250 V 输出，升压变压器额定电压为 0.22/35 kV，可满足 10 kV 线路的相电压测试。实验原理及各设备实物如图 11 所示。

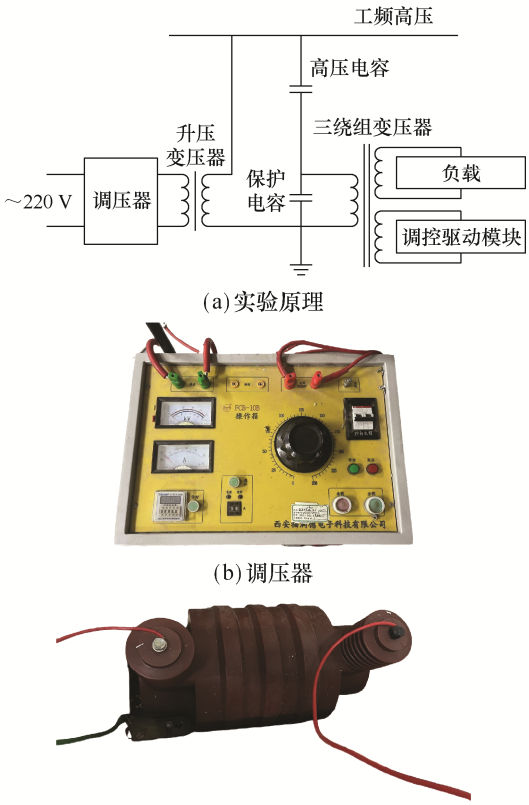


(a) 高压电容 (b) 三绕组取电变压器

(c) 采集及计算部分电路 (d) 驱动部分电路

图 10 三绕组变压器、调控驱动模块示意

Fig. 10 Schematic of three-winding transformer and control drive module



(a) 实验原理

(b) 调压器

(c) 升压变压器

图 11 实验设备

Fig. 11 Experimental equipment

分别按照仿真中设置的条件进行对照实验，即负载骤增、负载骤减、一次电压异常升高。其中负载骤增的模拟条件为负载阻值由 500 kΩ 快速减小至 5 kΩ，负载骤减的模拟条件为负载阻值由 50 kΩ 快速增大至 500 kΩ，一次电压异常升高的模拟条件为调压器输出电压由 36 V 快速增大至 69 V(对应升压变压器输出电压由 5.77 kV 增大至 10.96 kV)，实验测试输出波形如图 12 所示，相应实验数据见表 3。

负载骤增时，负载电压有效值瞬时降低至约 202 V，在 2.0 s 后升高至约 220 V；负载骤减时，负载电压有效值瞬时升高至约 248 V，在 2.6 s 后恢复至约 220 V；一次电压异常升高时，负载电压有效值瞬时升高至约 240 V，在约 2.8 s 后降低至 220 V。

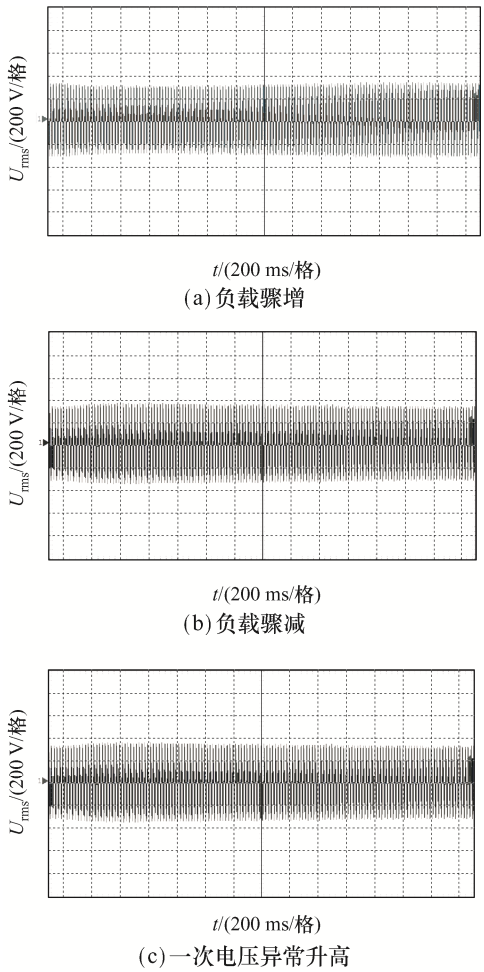


图 12 测试输出波形

Fig. 12 Output waveforms in test

对照仿真结果，各个工况下的实验结果中输出电压调整时间、电压偏移均显著增大，尤其是负载骤减情况下的电压偏移率达到了 12.7%，可能对实际负载造成不利影响。产生这一显著区别的主要原

因是实际装置的采集、计算过程引入了时间滞后，影响了反馈速度。但上述结果仍证明了基于 SPWM 的波形调制无功动态补偿方案的可行性。

表 3　基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案样机实验数据

Tab. 3 Experimental data of prototype under waveform modulation dynamic reactive power compensation scheme based on SPWM

测试项	工况	实验结果
调整时间/s	负载骤增	2.0
	负载骤减	2.6
	一次电压异常升高	2.8
电压偏移率/%	负载骤增	8.2
	负载骤减	12.7
	一次电压异常升高	10.9

5　结论

本文对电容限流取能方式无功补偿进行了理论计算，提出基于 PWM 的电压调控动态无功补偿方案和基于SPWM的波形调控动态无功补偿方案，进行多种工况下的仿真并研制样机进行了实验验证，得到以下结论。

(1)通过二次侧补偿电感或电容，可以对电容限流取能方式进行输出功率调制。

(2)基于 PWM 的电压调控动态无功补偿方案，可以通过动态等效电感实现对负载的交流稳压输出。

(3)基于 SPWM 的波形调制动态无功补偿方案能够主动调制负载正弦电压，并通过动态调整相位实现调控绕组的无功补偿、负载交流稳压。

参考文献：

[1] 高键鑫, 吴旭升, 高嵬, 等. 电磁感应式非接触电能传输技术研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 166-178.
Gao Jianxin, Wu Xusheng, Gao Wei, et al. Review on inductive contactless power transfer technology [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 166-178. (in Chinese)

[2] 樊龙海, 许建平, 任胜, 等. 双边 LCC 补偿恒压输出感应电能传输系统参数优化设计方法[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 196-204.
Fan Longhai, Xu Jianping, Ren Sheng, et al. Parameter optimization design method for inductive power transfer system with constant-voltage output based on double-sided LCC compensation [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 196-204. (in Chinese)

[3] 余嘉淇, 周凌云, 刘顺攀, 等. 基于集电线圈复用的电动磁浮列车感应式电能传输技术研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 976-986.
Yu Jiaqi, Zhou Lingyun, Liu Shunpan, et al. Research on inductive power transfer method for electrodynamic suspension maglev train based on collector coil reuse [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (4): 976-986. (in Chinese)

[4] 王展, 蓝鲲, 张金刚, 等. LCC-S 型箭地无线电能传输系统谐振网络参数优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 197-206.
Wang Zhan, Lan Kun, Zhang Jingang, et al. Parameter optimization method for wireless power transfer system between rocket and ground with LCC-S-type resonant network [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 197-206. (in Chinese)

[5] 李勇, 罗海军, 杨环宇, 等. 基于磁心与线圈参数优化的非侵入式磁场取能系统功率密度提升方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 313-324.
Li Yong, Luo Haijun, Yang Huanyu, et al. Power density improvement method of non-invasive magnetic field energy harvester system based on optimization of magnetic core and coil parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 313-324. (in Chinese)

[6] 何宁辉, 张佩, 吴旭涛, 等. 用于输电线路监测设备的一种电场感应取能电源[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 203-209.
He Ninghui, Zhang Pei, Wu Xutao, et al. Electric field induction power supply used in monitoring device of transmission line [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18 (5): 203-209. (in Chinese)

[7] 田伟明. 电容分压式高压取电电源的研究与设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
Tian Weiming. Research and design of capacitive divider energy harvesting power supply [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[8] 杨兰均, 史宇昊. 一种无功补偿式电容降压取电装置及工作方法: CN110544942B[P]. 2021-07-13.

[9] 黄继盛, 贾洪瑞, 刘学忠, 等. 基于高压陶瓷电容的自取能与暂态电压监测一体化传感器设计与特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(3): 86-92.
Huang Jisheng, Jia Hongrui, Liu Xuezhong, et al. Characteristics of an integrated sensor with self-extraction energy and transient voltage monitoring based on HV ceramic capacitor [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3): 86-92. (in Chinese)

[10] 董叶叶. 基于电流互感器的电压源设计及控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Dong Yeye. Research on design and control method of votage energy source based on current transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)

[11] 陈由杰, 季雨枫, 潘盼, 等. 基于阻抗匹配的输电线路在线取能方法[J]. 科技与创新, 2021(13): 137-138.
Chen Youjie, Ji Yufeng, Pan Pan, et al. On-line energy extraction method for transmission lines based on impedance matching [J]. Science and Technology & Innovation, 2021(13): 137-138. (in Chinese)

[12] 刘强, 赵文晶. 基于自适应虚拟阻抗的新能源微电网功率控制系统[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 75-82.
Liu Qiang, Zhao Wenjing. New energy microgrid power control system based on adaptive virtual impedance [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 75-82. (in Chinese)

[13] 张帅. 电容式高压取电方法及稳态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
Zhang Shuai. Capacitive high-voltage method to take power and the research of its steady properties [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)

[14] 孟庆欢. 智能电器高压端取电电源研究与设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Meng Qinghuan. Research and design on power taking from high voltage transmission line for intelligent elect- rical apparatus [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[15] 王毓, 贺煜峰, 莫昌锋. 基于 LC 谐振取电及零序电压测量系统的设计[J]. 电测与仪表, 2018, 55(11): 78-82, 93.
Wang Yu, He Yufeng, Mo Changfeng. Design of power supply based on LC resonance and zero sequence voltage measurement system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(11): 78-82, 93. (in Chinese)

[16] 董昱廷, 曹新慧, 李忠政, 等. 高压电容取电技术的研究与设计[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(3): 5-8, 26.
Dong Yuting, Cao Xinhui, Li Zhongzheng, et al. Research and design of high-voltage capacitor power-taking technology [J]. Automation & Instrumentation, 2020, 35 (3): 5-8, 26. (in Chinese)

[17] 唐赈. 一种高压电容降压取电装置及取电方法: CN105990855A[P]. 2016-10-05.

[18] 史宇昊, 王鸿, 薛枫, 等. 10 kV 系统电容取能方式电源特性分析[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 118-127.
Shi Yuhao, Wang Hong, Xue Feng, et al. Analysis of power supply characteristics of capacitor energy extraction method in 10 kV power system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 118-127. (in Chinese)



史宇昊

作者简介：

史宇昊(1996—)，男，博士研究生。研究方向：电力系统取能。E-mail：shiyuhao96@stu.xjtu.edu.cn。

胡康涛(1990—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统。E-mail：08hukangtao@163.com。

陈小军(1988—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统。E-mail：46521879@qq.com。

陈韬(1990—)，男，本科，工程师。研究方向：电力系统。E-mail：389607262@qq.com。

杨兰均(1968—)，男，通信作者，硕士，教授。研究方向：脉冲功率，新型电力系统。E-mail：yanglj@xjtu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)