

一种双极性 Buck-Boost AC-AC 电力弹簧

张涛^{1,2}, 韩庆林¹, 张丽^{1,3}, 李云飞¹, 白文龙¹, 张亚飞¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省智能装备直驱技术与控制国际联合实验室, 河南 焦作 454003; 3. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003)

摘要:针对现有电力弹簧(ES)区分关键负载(CL)与非关键负载(NCL)后 NCL 无法在额定电压下工作、AC-AES 型电力弹簧存在换流复杂和补偿范围小的问题,依据 AC-AC 变换器双极性调节电压的工作原理,研究了一种双极性 Buck-Boost AC-AC 电力弹簧(BBAC-ES)并阐述了 BBAC-ES 的工作原理及电压补偿策略。通过公式推导得出 BBAC-ES 装置输入输出的电压关系以及电压补偿原理。其次,将 BBAC-ES 与现有的 ES 进行对比分析, BBAC-ES 无需划分 CL 与 NCL,并且可以在不增加死区以及控制复杂度的情况下实现开关管自然换流;同时 BBAC-ES 可以在两个占空比 d_1 与 d_2 的相互调谐下输出同相及反相升降压,可以缓解 +110% 和 -40% 的电压幅值波动稳定 CL 电压,电压补偿范围是 AC-AES 的 3 倍。最后,通过仿真并搭建 1 kW 的实验平台,验证 BBAC-ES 装置在电压波动时稳定负载电压的有效性。

关键词:新能源;电能质量;电力弹簧;双极性 AC-AC;电压稳定;补偿范围

DOI:10.15938/j.emc.2026.02.010

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2026)02-0111-11

Bipolar Buck-Boost AC-AC electric springs

ZHANG Tao^{1,2}, HAN Qinglin¹, ZHANG Li^{1,3}, LI Yunfei¹, BAI Wenlong¹, ZHANG Yafei¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Direct Drive and Control of Intelligent Equipment, Jiaozuo 454003, China;

3. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: To address the issues that, after distinguishing critical loads (CL) and non-critical loads (NCL) in conventional electric spring (ES), the NCL cannot operate under rated voltage, and that the AC-AES electric spring suffers from complex commutation and a limited compensation range, a bipolar Buck-Boost AC-AC electric spring (BBAC-ES) was proposed based on the operating principle of bipolar voltage regulation in AC-AC converters. The operating mechanism and voltage compensation strategy of the BBAC-ES were systematically analyzed. The input-output voltage relationship and compensation principle of the proposed topology were derived through theoretical analysis. Furthermore, a comparative study between the BBAC-ES and existing ES topologies was conducted. The results show that the proposed BBAC-ES eliminates the need to distinguish between CL and NCL, and achieves natural commuta-

收稿日期: 2024-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(U1804143); 河南省科技攻关项目(202102210295); 河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF210424); 河南省科技创新团队基金(CXTD2017085)

作者简介: 张涛(1978—),男,博士,高级工程师,研究方向为新能源功率变换、电力电子装置、智能控制;

韩庆林(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动;

张丽(1982—),女,博士,副教授,研究方向为智能用电信息处理技术;

李云飞(1997—),女,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动;

白文龙(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动;

张亚飞(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动。

通信作者: 韩庆林

tion of switches without introducing dead time or increasing control complexity. In addition, by coordinating two duty cycles, d_1 and d_2 , the BBAC-ES is capable of realizing both in-phase and out-of-phase buck-boost operations, effectively mitigating voltage fluctuations of +110% and -40%, thereby maintaining stable voltage across critical loads. The compensation range of the proposed topology is approximately three times that of the conventional AC-AES. Finally, simulation studies and a 1 kW experimental prototype are carried out to validate the effectiveness of the proposed BBAC-ES in stabilizing load voltage under fluctuating grid conditions.

Keywords: new energy; power quality; electric springs; bipolar AC-AC; voltage stabilization; scope of compensation

0 引言

随着能源格局的重大变化,高比例新能源接入已成为世界各国电力系统发展的必然趋势^[1-2]。新能源波动性、间歇性特点增加了电力系统调节负担^[3],同时导致新能源市场就地消纳能力不足,出现了弃风弃光^[4]的问题,能源高比例接入所带来的挑战及其应对措施已被广泛讨论和研究,当前主要面临短时电力电量平衡难度高、电网稳定风险加大、故障及扰动抵御能力下降、系统成本较高等问题^[5-8]。尤其是当这些分布式电源接入配电网中,其发电能力受自然条件影响较大,会加剧配电网中电压波动等电能质量问题。电压波动会影响电力系统的稳定性,甚至会损坏电力系统设备。需要采取有效的方法和设备来应对新能源发电带来的电压波动问题,否则会对电力系统运行造成严重的影响。

目前针对配电网电压波动问题,主要采用三种方式:储能设备、无功补偿设备、用户负载控制。储能设备要求极高的稳定性,而且随着可再生能源的发展,储能设备的成本会急剧上升。对于无功补偿设备,工程中常用的有静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止无功发生器(static var generator, SVG)^[9],然而实际应用中,其容量较大,维护流程复杂,维护成本高,当设备故障时,会影响到系统稳定。用户负载控制有实时电价与负载开关控制^[10-12]两种形式,都会影响负载侧的正常用电需求,不能作为解决电能质量问题的长久方法。

香港大学的许树源团队在2012年提出电力弹簧(electric spring, ES)的概念^[13],是一种从需求侧管理的方法,可以用来解决需求侧电能波动的问题。通过采取合适的控制策略,可以调节输出稳定负载电压。除此之外,ES还可以进行频率调节,以及功率因数校正、减少储能需求、缓解功率不平衡、抑制

谐波、调节潮流分布等功能^[13]。ES作为一种新型的电力系统设备,可以分布式接入电网,单个ES设备的损坏并不会影响整个系统,在未来的电网中承担着重要的作用。

从ES被提出至今,ES的拓扑结构也在不断地进行改进。文献[13]提出最初的电力弹簧拓扑结构ES-1;文献[14]详细阐述了ES各种不同结构的原理及优劣势,对ES各种常用的控制策略进行分析。文献[15]通过对拓扑结构的分析验证了ES-1拓扑对负载电压稳定的能力,而且对ES-2拓扑的功率因数校正作用进行分析;文献[16]提出了多个电力弹簧的分布式控制策略,并将其用于微电网电压控制;文献[17-18]根据最初拓扑ES-1,将其直流侧电容替换为储能设备提出了新的拓扑ES-2,并通过实验验证了其功率因数校正和电压的稳定能力。文献[19]提出了一种ES-B2B拓扑,加入了直流单元,并通过实验对比了ES-1与ES-B2B拓扑的电压稳定能力。文献[20]提出了AC-AC型ES拓扑结构,阐述了其优势并通过实验验证其稳压能力。

目前较为常用的ES是基于ES-1和ES-2做出的改进,传统的ES有“关键负载”(critical load, CL)和“非关键负载”(non-critical load, NCL)之分,ES与NCL串联构成智能负载。这是在牺牲NCL的情况下稳定负载侧电压,如今用户侧对电能质量的要求提高,传统ES使NCL不能在额定电压下工作,而且稳压方式受线路参数影响大^[20]。文献[20]提出的AC-AES型ES虽可以主动补偿负载电压,但其控制策略在AC-AC结构换流时需要设置死区时间,增加了控制的复杂性,其拓扑结构输出电压与输入电压仅存在降压关系,这会使得电力弹簧的补偿范围较小。

因此,为了解决上述ES存在的问题,本文基于

文献[21]提出双极性 Buck-Boost AC-AC 电力弹簧(BBAC-ES)。本文结合双极性 AC-AC 拓扑结构和传统电力弹簧模型,通过分析 BBAC-ES 的数学模型和工作原理,推导出所设计 BBAC-ES 的电压补偿范围,与传统 ES 及 AC-AES 型 ES 对比, BBAC-ES 装置可以简化接入负载侧的方式,与 AC-AES 型 ES 相比拓扑结构比较简单且可实现自然换流,控制策略也易于实现,电压补偿范围大。最后,通过仿真和 1 kW 实验平台验证 BBAC-ES 在电压补偿的可行性。

1 BBAC-ES 拓扑结构及工作原理

1.1 传统 ES 理论

ES 用于电力系统时将负载分为两类,一类是可以承受很小范围电压波动的 CL,一类是可以承受承受较大电压波动的 NCL。ES 理论是将机械弹簧的原理类比到电力系统中,通过一系列的控制将 CL 电压在电网波动情况下稳定在需要的范围内,同时会将能量的波动转移到 NCL。ES 结构类比机械弹簧的 3 种状态:平衡状态、压缩状态和拉伸状态也会相应存在 3 种状态:阻性状态、感性状态和容性状态^[22-23]。

图 1 所示为第一代 ES 结构,主要由一个电压源型逆变器和 LC 滤波器组成,直流侧为电容。其中 U_g 代表电网电压; $R+jX$ 代表输电线阻抗; Z_{cl} 代表关键负载; Z_{nel} 代表非关键负载。S 为使能开关,当 S 断开时表示 ES 未投入使用; S 闭合时, ES 投入使用,当电网电压出现波动, ES 可以作为无功发生器稳定负载电压,同时可以把能量波动转移到 NCL 上。ES 工作原理如图 2 所示,图 2(a) 为 ES 未投入使用时的工作状态,此时 CL 与 NCL 都并联在电网上。图 2(b) 表示 ES 工作在感性模式,此时 ES 电流 i_3 滞后 ES 电压 U_{ES} 角度 90° 。图 2(c) 表示 ES 工作在容性模式,此时 ES 电流 i_3 超前 U_{ES} 角度 90° ^[22]。

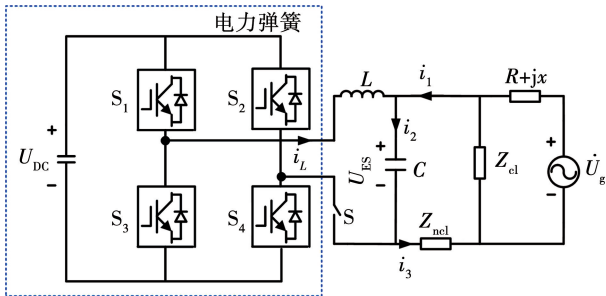


图 1 ES-1 拓扑结构

Fig. 1 ES-1 topology

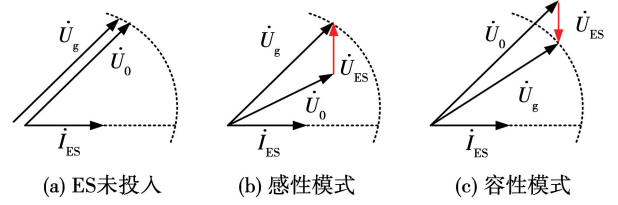


图 2 ES 投入前后工作模式

Fig. 2 ES before and after commissioning

1.2 BBAC-ES 系统结构

本文提出的 BBAC-ES 装置将 AC-AC 变换器与传统的工频变压器结合,结构由双极性 Buck-Boost AC-AC 变换器、1 台工频隔离变压器、以及 LC 滤波器构成。接入系统后如图 1 所示。

BBAC-ES 装置的工作方式是负载串联接入电网。首先电网电压 U_g 经过 AC-AC 变换器输出电压 U_{AC} , 经过滤波器后与工频变压器一次侧并联, 变压器二次侧与负载串联接入电网。当电网电压出现暂升或暂降时, BBAC-ES 装置可以输出补偿电压 U_{ES} 对负载电压进行补偿。

BBAC-ES 装置有如下电压关系:

$$U_0 = U_g - U_{ES} \quad (1)$$

式中: U_g 为电网电压; U_0 为负载侧电压; U_{ES} 为变压器一次侧电压, 也为 ES 的补偿电压; 本文变压器变比选择为 1:1。

本文提出的 BBAC-ES 装置核心为双极型 Buck-Boost AC-AC 变换器, 具有交流 H 桥结构。如图 3 所示, 图中 SP 支路, RP 支路由 4 个 IGBT 组成, 每个支路中间增加 2 个快速恢复二极管, 将二极管 D_{1b} 、 D_{2b} 、 D_{3b} 、 D_{4b} 分布在开关管中间 (D_{1b} 、 D_{2b} 用于 SP 支路, D_{3b} 、 D_{4b} 用于 RP 支路), 2 个支路中间用隔离电感器 (SP 支路为 L_{1a} 、 L_{1b} , RP 支路为 L_{2a} 、 L_{2b}) 相连。电容 C_1 和 C_2 与 SP 支路的 S_{1b} 和 D_{2b} 并联, 可以在死区期间提供电感电流路径。电容器 C_3 和 C_4 并联在 SP 支路和 RP 支路上, 输入电压 U_g 与 SP 支路和 RP 支路共用接地点, 其正 (参考) 端连接至隔离电感器。

1.3 BBAC-ES 工作原理

由 BBAC-ES 的系统结构可知, AC-AC 变换器有 2 条支路, 2 条支路对应的占空比分别为 d_1 、 d_2 。图 4 为 $d_1 > d_2$ 时 BBAC-ES 的开关管控制信号。

图 4 中: U_i 为三角波信号; d_1 为 SP 支路的调制比; d_2 为 RP 支路的调制比。

2 个占空比 d_1 和 d_2 一起调谐以提供较大的控制自由度。 S_1 信号控制开关管 S_{1a} 、 S_{1b} ; S_2 信号控制开关管 S_{2a} 、 S_{2b} ; S_3 信号控制开关管 S_{3a} 、 S_{3b} ; S_4 信号控制

开关管 S_{4a} 、 S_{4b} 。当 $d_1 > d_2$ 时, SP 支路中的互补开关 S_{1a} 、 S_{1b} 与 S_{2a} 、 S_{2b} 的导通时间间隔分别为 $d_1 T_s$ 、 $(1 - d_1) T_s$ 。当 $d_1 < d_2$ 时, RP 支路中的互补开关 S_{3a} 、 S_{3b} 与 S_{4a} 、 S_{4b} 的导通时间间隔分别为 $d_2 T_s$ 、 $(1 - d_2) T_s$ 。当 $d_1 > d_2$ 和 $d_1 < d_2$ 时, 分别获得同相和反相输出电压。 d_1 与 d_2 的取值范围为 $0 \sim 1$, 2 个占空比可以分别进行设置。

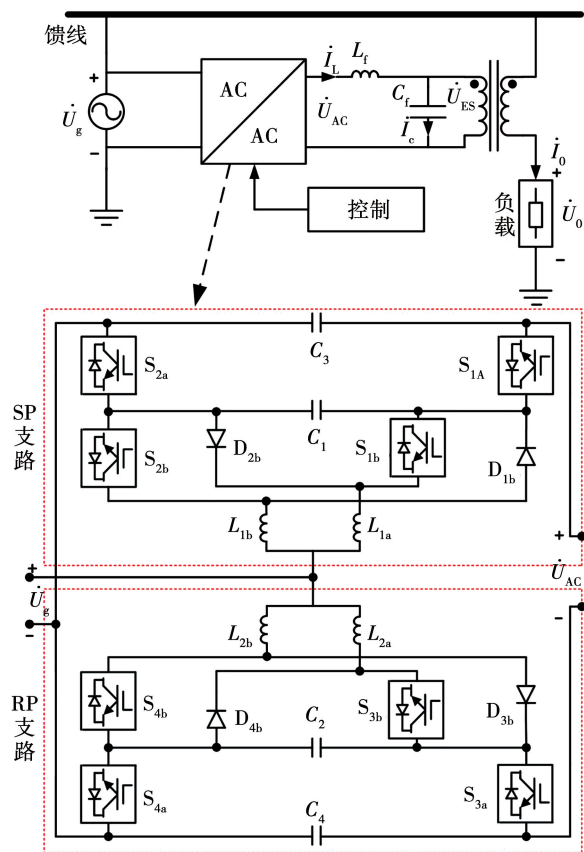


图 3 BBAC-ES 系统结构

Fig. 3 BBAC-ES system structure

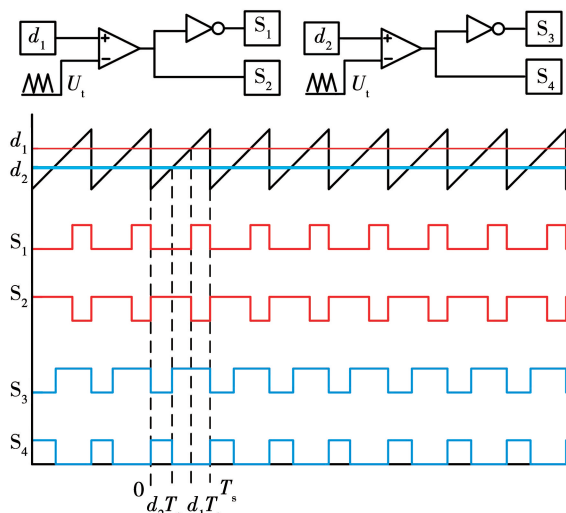
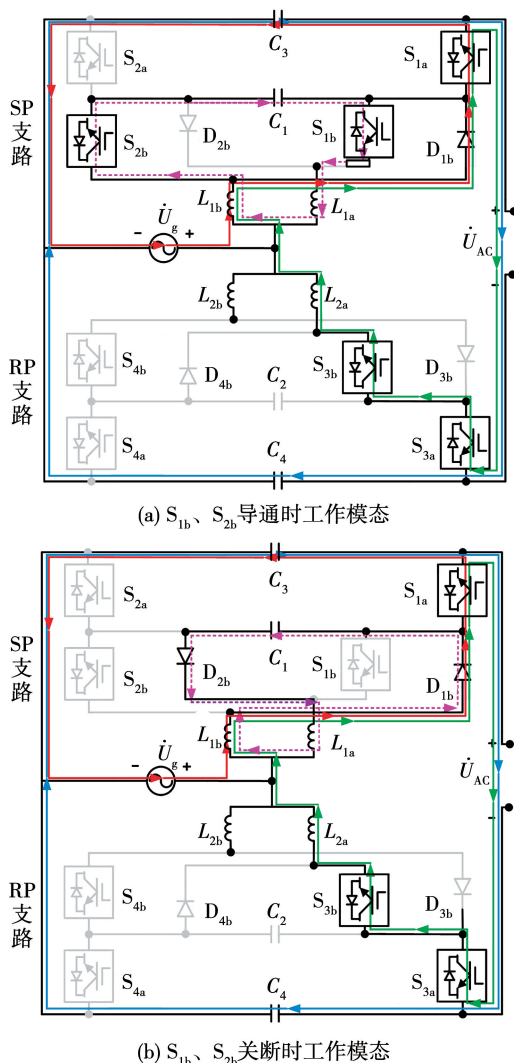
图 4 $d_1 > d_2$ 时 PWM 调制图Fig. 4 PWM modulation diagram at $d_1 > d_2$

图 5 为 $d_2 = 0$ 时变换器换流工作模式, 由于开关器件的有限响应时间和栅极驱动电路的时间延迟, 高频互补开关之间存在较短的死区或重叠时间。为了解释 AC-AC 变换器的自然换流能力, 在高频互补开关 S_{1b} 和 S_{2b} 中插入短的重叠时间和死区时间, 如图 5(a) 所示, 当 S_{1b} 和 S_{2b} 都导通时, 电感器 L_{1a} 和 L_{1b} 提供高阻抗路径来限制 C_1 电流, 使电容器 C_1 避免被击穿。图 5(b) 显示了当 S_{1b} 和 S_{2b} 都关断时的等效电路, 此时处于死区时间, 电容器 C_1 和二极管 D_{1b} 、 D_{2b} 为电感器 L_{1a} 和 L_{1b} 的电流提供连续路径。

图 5 $d_2 = 0$ 时变换器换流工作模式Fig. 5 Converter commutation working mode at $d_2 = 0$

该 AC-AC 变换器输出电压及电压增益 G 可以由下式表示:

$$U_{ES} = U_{C_3} - U_{C_4} = \frac{U_g}{1 - d_1} - \frac{U_g}{1 - d_2}; \quad (2)$$

$$G = \frac{U_{ES}}{U_g} = \frac{1}{1 - d_1} - \frac{1}{1 - d_2}. \quad (3)$$

BBAC-ES 可以输出双极性电压,并且可以通过占空比的调整进行升压与降压。图 6 所示为 AC-AC 变换器占空比与电压增益的关系:在 $d_1 = 0$ 时变换器工作在反相升降压模式, $0 < d_2 < 0.5$ 时,变换器处于反相降压模式, $0.5 < d_2 < 1$ 时,变换器处于反相升压模式。电压增益 G_1 为

$$G_1 = -\frac{d_2}{1-d_2}。$$

(4)

当 $d_2 = 0$ 时,变换器工作在同相升降压模式, $0 < d_1 < 0.5$ 时,变换器处于同相降压模式, $0.5 < d_1 < 1$ 时,变换器处于同相升压模式。电压增益 G_2 为

$$G_2 = \frac{d_1}{1-d_1}。$$

(5)

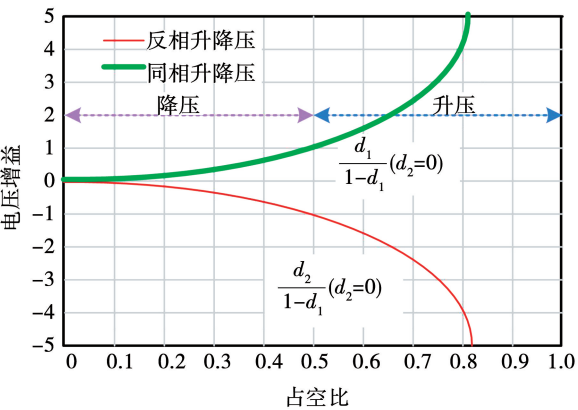


图 6 电压增益与占空比的曲线图

Fig.6 Plot of voltage gain versus duty cycle

BBAC-ES 可以输出正相及反相电压,如图 7 所示,在电网电压波动时稳定负载电压,当电网电压暂升时, BBAC-ES 会输出一个同相补偿电压 U_{ES} 使得负载在电压稳定在参考电压 U_{0ref} 附近,当电网电压出现暂降时, BBAC-ES 会输出一个反相补偿电压稳定负载两端电压,满足式(1)的电压关系。通过对 d_1 与 d_2 占空比大小关系进行设置, BBAC-ES 可以输出不同的电压,对负载电压进行调控,从而提供更大的自由度来调节输出电压。

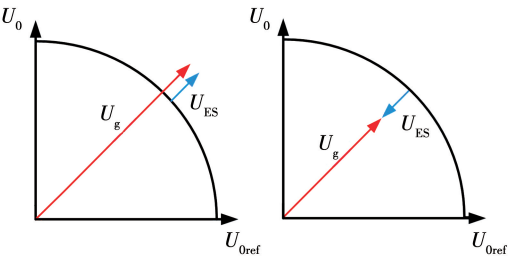


图 7 电网电压波动补偿原理

Fig.7 Principle of compensation for voltage fluctuations in the power grid

2 ES 对比分析

2.1 拓扑结构

为了分析所提装置的优势,将 BBAC-ES 同目前常用的拓扑结构有 ES-1、ES-2、ES-B2B 结构及 AC-AES 进行对比,具体如表 1 所示。

表 1 不同类型 ES 对比

Table 1 Comparison of different types of ES

ES 类型	NCL	功率变换类型	外部储能	双极性升降压
ES-1	有	单级	无	否
ES-2	有	单级	有	否
ES-B2B	有	两级	有	否
AC-AES	无	两级	无	否
BBAC-ES	无	两级	无	是

由表 1 可知, ES-1 拓扑结构较为简单,只能对负载进行无功功率补偿,补偿范围较小,其补偿电压在实际应用中可能不满足需求; ES-2 将 ES-1 直流侧替换为储能装置,可以提供有功功率的补偿,但受储能装置的影响较大,往往需要较大容量的储能装置,因此在成本方面会有所提高; ES-B2B 结构省去了储能装置,将交流侧进行整流来给负载提供补偿,运行稳定而且可以对电网功率因数进行调节,但 ES-B2B 结构会增加一定的复杂性,直流环节的加入会对系统效率存在影响,而且对装置寿命和系统的维护费用会产生影响; AC-AES 与传统的 ES 相比没有储能元件,也不用区分 CL 与 NCL,与 ES-B2B 的开关管数量相同,减少了直流环节,但拓扑结构在换流时增加了控制的复杂性,而且 AC-AES 只有降压环节,会影响其补偿范围。

本文所提出的 BBAC-ES 装置可以提供连续的输入电流,在 2 个占空比互相调谐之下可以提供同相升降压和反相升降压,增加了负载电压补偿范围。BBAC-ES 没有 NCL,无须外部储能系统,同时无直流环节,变换器在不增加 PWM 死区和控制复杂度的情况下,实现自然换流。

2.2 补偿范围

本文所提出的 BBAC-ES 装置可以输出与 U_g 同相位或反相位的电压,由图 1 系统结构可以看出,电网电压 U_g 与负载电压 U_0 始终保持在同一相位,且具有相同的频率,因此以下公式均以标量表示。本文

采用同相补偿法^[24]控制 U_{ES} 对负载电压 U_0 进行补偿。

根据同相补偿法及系统结构可以得到 BBAC-ES 的补偿范围:

$$U_0 = U_g - U_{ES}; \tag{6}$$

$$U_{ES} = (\frac{1}{1-d_1} - \frac{1}{1-d_2})U_g \circ \tag{7}$$

由于占空比

$$d_1 \in [0,1), d_2 \in [0,1) \circ \tag{8}$$

可以推导出:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{1-d_1} - \frac{1}{1-d_2} &\in (-\infty, +\infty); \\ U_{ES} &\in (-\infty, +\infty)U_g; \\ U_0 &\in (0, +\infty)U_g \circ \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

由式(6)与式(9)可以推导得到:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &\in (0, +\infty); \\ U_{ES} &= U_g - U_0; \\ U_{ES} &\in (-\infty, U_g) \circ \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{ES} &= (d_1 - d_2)U_g; \\ U_{ES} &\in (-U_g, U_g); \\ U_0 &\in (0, U_g) \circ \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式(10)为 BBAC-ES 的 U_{ES} 范围,式(11)为 AC-AES 的 U_{ES} 范围,两者对比可以看出, BBAC-ES 可以输出更大的反相电压,而 AC-AES 的输出电压仅仅在 ± 1 倍电网电压大小内, BBAC-ES 对电压暂降补偿更为出色。

本文设定 $d_2 = 0.5$, 可以推导得到 BBAC-ES 的输出电压 U_{ES} 范围为:

$$\left. \begin{aligned} U_{ES} &= (\frac{1}{1-d_1} - 2)U_g; \\ U_{ES} &\in (-U_g, +\infty); \\ U_0 &= (3 - \frac{1}{1-d_1})U_g; \\ U_0 &\in (0, 3U_g) \circ \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

由式(6)与式(12)可以推导得到:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &\in (0, 3U_g); \\ U_{ES} &= U_g - U_0; \\ U_{ES} &\in (-2U_g, U_g) \circ \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

式(13)为 BBAC-ES 在 $d_2 = 0.5$ 时 U_{ES} 的范围, 式(14)为 AC-AES 在 $d_2 = 0.5$ 时 U_{ES} 的范围, 两者对比可以看出, BBAC-ES 的 U_{ES} 范围在两倍反相电网

电压与一倍正相电网电压内, 而 AC-AES 的输出电压仅仅在 $\pm 1/2$ 电网电压大小内。因此, 当 $d_2 = 0.5$ 时, BBAC-ES 对电压暂降补偿更为出色。

$$\left. \begin{aligned} U_{ES} &= (d_1 - \frac{1}{2})U_g; \\ U_{ES} &\in (-\frac{1}{2}U_g, \frac{1}{2}U_g); \\ U_0 &= (\frac{3}{2} - d_1)U_g; \\ U_0 &\in (\frac{1}{2}U_g, \frac{3}{2}U_g) \circ \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

本文设定电网电压为 220 V, 当 $d_2 = 0.5$ 时, 取不同参考电压 U_{0ref} , 对比 BBAC-ES 与 AC-AES 装置对应的 d_1 与 U_{ES} 大小关系。如表 2 所示, 在负载参考电压 U_{0ref} 等于 70、90、440 V 时, AC-AES 装置此时占空比 $d_1 < 0$ 或 $d_1 > 1$, 超出其电压补偿范围, 而本文 BBAC-ES 装置在设定不同参考电压下都有对应的 d_1 及 U_{ES} 值。因此, 在 220 V 电压等级情况下 BBAC-ES 装置有较大的补偿范围, 能够确保设备在不同电压条件下稳定运行。

表 2 不同 U_{0ref} 下 d_1 与 U_{ES} 对比

Table 2 Comparison of d_1 and U_{ES} under different U_{0ref}				
U_{0ref}/V	d_1 (AC-AES)	d_1 (BBAC-ES)	U_{ES} (AC-AES)	U_{ES} (BBAC-ES)
70	$d_1 > 1$	0.627	—	$0.682U_g$
90	$d_1 > 1$	0.614	—	$0.591U_g$
110	1	0.6	$0.5U_g$	$0.5U_g$
220	0.5	0.5	0	0
330	0	0.333	$-0.5U_g$	$-0.5U_g$
440	$d_1 < 0$	0	—	$-U_g$

通过以上对比分析可以得出结论: BBAC-ES 的补偿范围较 AC-AES 大, 可以补偿较大范围的电压暂降, 在相同设定条件 $d_2 = 0.5$ 时补偿范围是 AC-AES 的 3 倍, 能够确保设备在不同电压条件下稳定运行。

3 BBAC-ES 仿真验证

3.1 控制策略

本文采用误差 PI 控制策略, 图 6 为本文的控制策略图。 U_0 为负载输出电压采样值; U_{0ref} 为参考电压; D 为变换器输出占空比。

设定 $d_2 = 0.5$, 输出占空比 D 由下式表示:

$$D = \frac{1}{1 - d_1} - 2。$$

(15)

由图 8 可以看出,当 ES 投入工作时,由采样电路获取输出电压的采样值,与参考电压相比较得到误差 e ,然后由比例积分控制器对占空比进行调控,产生 PWM 高频信号对 8 个开关管进行控制。

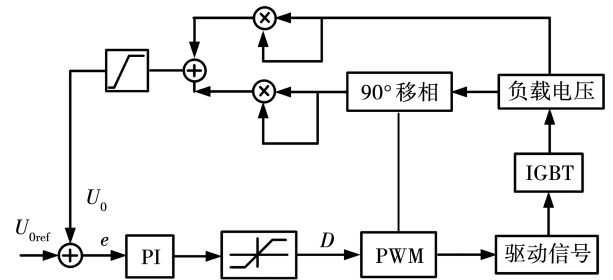


图 8 BBAC-ES 控制策略图

Fig. 8 BBAC-ES control policy diagram

3.2 稳定负载电压仿真对比验证

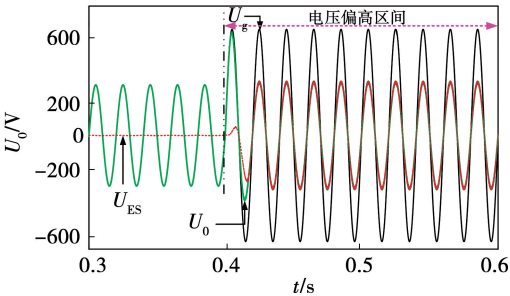
为了验证所设计 BBAC-ES 的电压调控能力,在 MATLAB/Simulink 中搭建模型,并将结果与 AC-AES 进行对比。系统各元件参数见表 3。

表 3 仿真参数设置

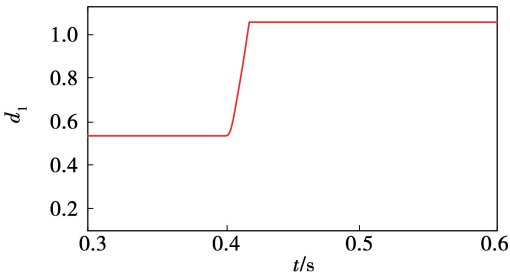
参数	数值
电压等级/V	220
开关频率 f_s /kHz	30
负载阻抗 Z/Ω	40
滤波电感 L_f /H	1×10^{-3}
滤波电容 C_f /F	3×10^{-6}
钳位电容 $(C_1 - C_4)$ /F	3×10^{-6}

本文模拟了电网电压暂升暂降两种运行情况来验证 BBAC-ES 稳定负载电压的能力。根据表 3 参数,电网电压 U_g 为 220 V,对 U_g 分别设定 +110% 和 -40% 的幅值波动,对比 AC-AES 与 BBAC-ES 负载侧电压 U_0 随时间变化波形,如图 9、图 10 所示。

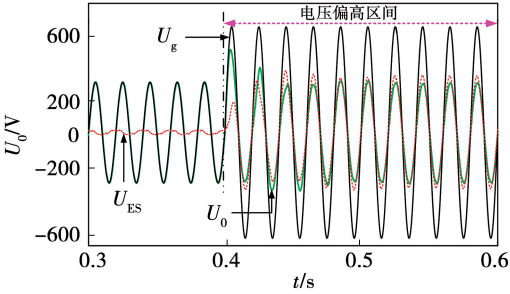
在 0.4 s 时 U_g 设置 +110% 的幅值波动, U_g 电压波动由 220 V 暂升至 462 V,如图 9 (a) 所示,AC-AES 会输出一个与 U_g 同相位的 U_{ES} ,但此时 AC-AES 的占空比 d_1 达到限值, d_1 恒为 1,如图 9 (b) 所示。此时 AC-AES 没有输出相应的 U_{ES} 使得负载稳定在 220 V。



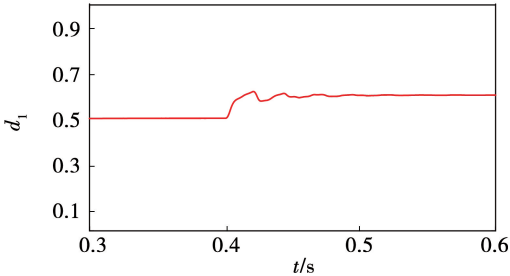
(a) AC-AES U_g 电压暂升



(b) AC-AES d_1 变化



(c) BBAC-ES U_g 电压暂升



(d) BBAC-ES d_1 变化

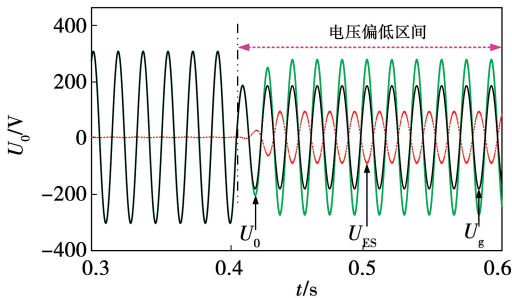
图 9 220 V 电压暂升对比

Fig. 9 220 V voltage slap comparison

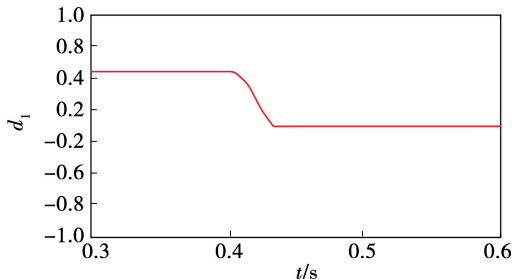
图 9 (c) 为电网电压由 220 V 暂升至 462 V 时 BBAC-ES 负载侧电压 U_0 随时间变化波形。BBAC-ES 会迅速输出一个与 U_g 同相位的 U_{ES} ,使负载侧电压稳定在 220 V,此时 U_{ES} 有效值大于 U_0 , U_{ES} 、 U_0 、 U_g 三者之间的电压关系满足式 (6)。如图 9 (d) 所示,此时占空比 d_1 在 0.6 左右,与理论相符。

图 10 (a) 所示为 U_g 由 220 V 暂降至 132 V 时 AC-AES 负载侧电压 U_0 随时间变化波形。AC-AES

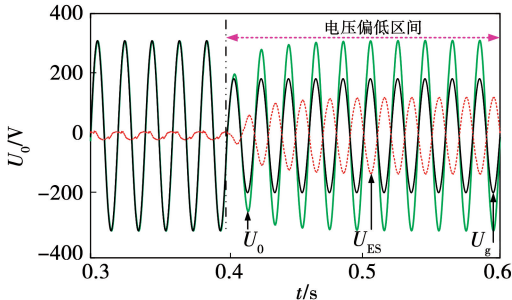
会输出一个与 U_g 反相位的 U_{ES} ,但此时 AC-AES 的占空比 d_1 达到限值, d_1 恒为 0,如图 10(b)所示。此时输出电压有效值恒定在 66 V,没有输出相应的 U_{ES} 使得负载稳定在 220 V。



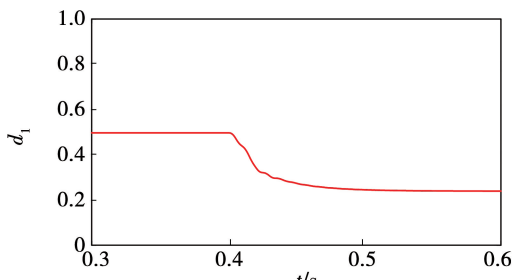
(a) AC-AES U_g 电压暂降



(b) AC-AES d_1 变化



(c) BBAC-ES U_g 电压暂降



(d) BBAC-ES d_1 变化

图 10 220 V 电压暂降对比

Fig. 10 220 V voltage sag comparison

图 10 (c) 所示为电网电压由 220 V 暂降至 132 V 时 BBAC-ES 负载侧电压 U_0 随时间变化波形。BBAC-ES 会迅速输出一个与 U_g 反相位的 U_{ES} ,使负载侧电压稳定在 220 V,此时 U_{ES} 、 U_0 、 U_g 三者之间的

电压关系满足式(6)。如图 10(d)所示,此时占空比 d_1 在 0.25 左右,与理论相符。

由图 9、图 10 的对比可以得到:BBAC-ES 具有更大的补偿范围,且波形质量较好,仿真结果与理论相符。

4 实验验证

本文搭建了 1 kW 的实验平台,并根据表 4 中给出参数进行了实验,对 BBAC-ES 的可行性进行验证,实验平台如图 11 所示。

表 4 实验参数设置

Table 4 Experimental parameter settings

参数	数值
额定功率 P/kW	1
开关频率 f_s/kHz	30
负载阻抗 Z/Ω	$40/40 + j20$
IGBT	CRC40T60AN3H
滤波电感 L_f/H	1×10^{-3}
滤波电容 C_f/F	3×10^{-6}
钳位电容 $(C_1 - C_4)/\text{F}$	3×10^{-6}

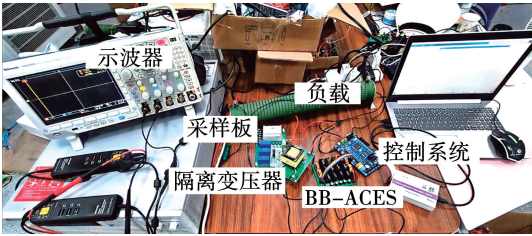


图 11 BBAC-ES 实验平台

Fig. 11 BBAC-ES experimental platform

根据实验室具体条件,本文假定负载额定电压 $U_{0\text{ref}}$ 为 110 V。分别设置 U_g 为 -20% 和 $+20\%$ 的幅值波动,使 U_g 分别暂降至 88 V 和暂升至 132 V,模拟电网电压波动的情况。实验选取阻性负载与阻感性负载进行实验验证以便充分证明 BBAC-ES 在电网电压波动中稳定负载电压的能力。

4.1 纯阻性负载

图 12、图 13 表示负载为纯阻性负载时 U_0 随时间变化波形。如图 12(a)所示,当电网电压 U_g 没有突变,此时补偿电压 $U_{ES} = 0$ V;当电网电压暂升,由 110 V 暂升到 132 V 时,BBAC-ES 会迅速做出反应,输出与 U_g 同相位的补偿电压 U_{ES} ,此时 U_{ES} 为 22 V,

响应时间为 0.02 s,使得负载两端电压稳定在 110 V。由图 12(b)的实验波形图可知,负载为阻性负载时两端电压电流同相位。

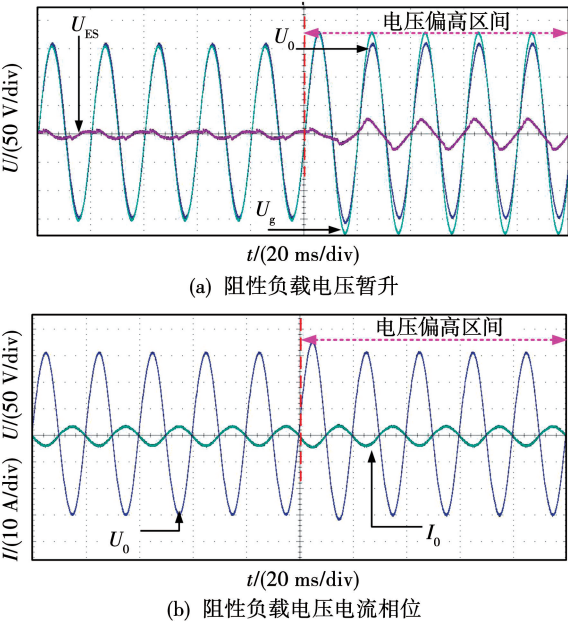


图 12 电网电压暂升时阻性负载波形

Fig. 12 Resistive load waveform when supply voltage rises temporarily

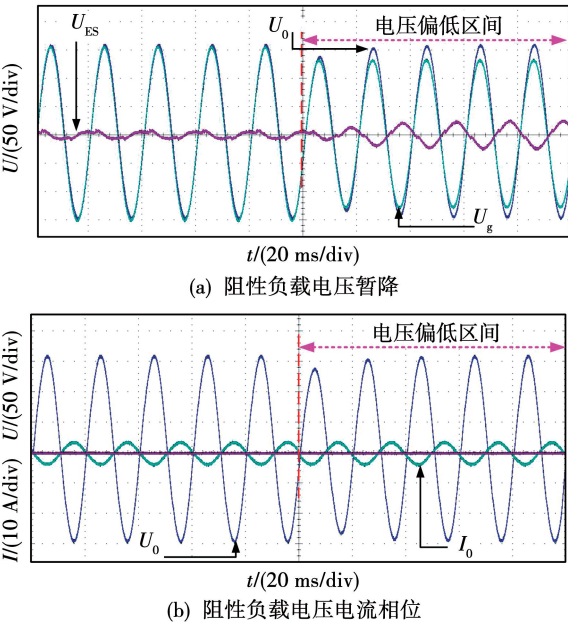


图 13 电网电压暂降时阻性负载波形

Fig. 13 Resistive load waveform when supply voltage sags temporarily

如图 13(a)的实验波形图,当电网电压 U_g 没有

突变,此时补偿电压 $U_{ES} = 0$ V;当电网电压暂降,由 110 V 暂降到 88 V 时,BBAC-ES 会迅速输出与 U_g 反相的 U_{ES} 来保证负载电压稳定在 110 V。此时 U_{ES} 为 22 V,响应时间为 0.02 s,由图 13(b)的实验波形图可知,在阻性负载下,负载侧的电压与电流相位相同。

4.2 阻感性负载

图 14、图 15 表示负载为阻感性负载时 U_0 随时间变化波形。如图 14(a)的实验波形图可知,当电网电压 U_g 没有突变,此时补偿电压 $U_{ES} = 0$ V;当 U_g 发生暂升,由 110 V 暂升到 132 V 时,BBAC-ES 会迅速做出反应,输出与 U_g 同相的补偿电压 U_{ES} ,使得负载两端电压稳定在 110 V。此时 U_{ES} 为 22 V,响应时间为 0.02 s,由图 14(b)的实验波形图可知,负载为阻感性负载时两端电压电流相位不同,相位相差 26° 左右。

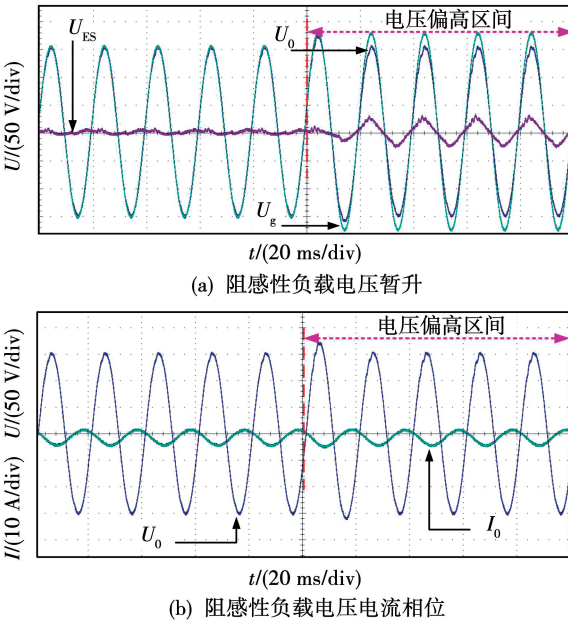


图 14 电网电压暂升时阻感性负载波形

Fig. 14 Resistive inductive load waveform when supply voltage rises temporarily

如图 15(a)的实验波形图,当电网电压 U_g 没有突变,此时补偿电压 $U_{ES} = 0$ V;当电网电压暂降,由 110 V 暂降到 88 V 时,BBAC-ES 会迅速输出与 U_g 反相的 U_{ES} 来保证负载电压稳定在 110 V。此时 U_{ES} 为 22 V,响应时间为 0.02 s,由图 15(b)的实验波形图可知,在阻感性负载下,负载的电压与电流相位差在

26°左右。

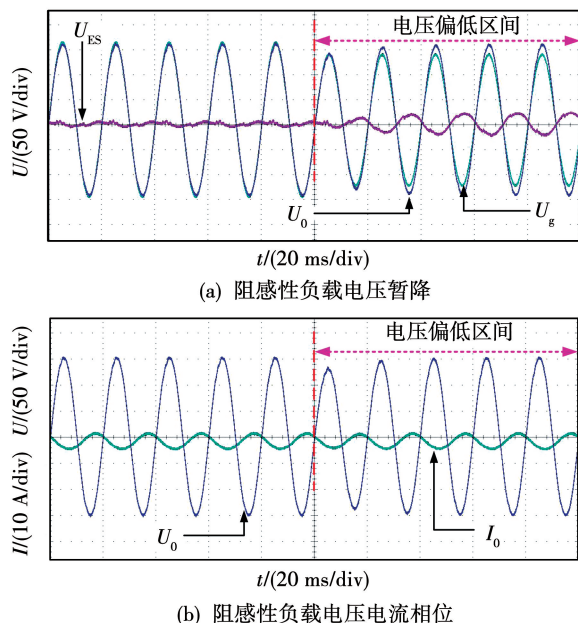


图 15 电网电压暂降时阻性负载波形

Fig. 15 Resistive inductive load waveform when supply voltage sags temporarily

由上述的实验结果可知,无论是阻性负载还是阻感性负载,当电网电压 U_g 出现波动时,BBAC-ES 装置都可以在 0.02 s 内输出补偿电压对负载侧电压进行补偿,并且可以快速响应,波形质量好。

5 结 论

本文通过理论和实验验证了 BBAC-ES 装置在电压调控的有效性和优越性,并可以得出以下结论。

1) BBAC-ES 在拓扑结构上具有一定的优势,装置在不增加 PWM 死区及控制负担的情况下可以实现自然换流,2 个占空比 d_1 与 d_2 可以在 0 ~ 1 范围内相互调谐使得装置有更大的自由度,产生高品质的输出补偿电压。

2) BBAC-ES 可接入感性负载,具有双极性降压 - 升压功能,可抑制电网电压 +110% 的及 -40% 的幅值波动来稳定负载电压,在相同设定条件 $d_2 = 0.5$ 时补偿范围是 AC-AES 的 3 倍,当网侧电压发生突变时,BBAC-ES 可以在 0.02 s 做出反应,输出补偿电压稳定负载电压。

本文提出的 BBAC-ES 装置只讨论了单相电压突变的情况,对其在三相电压突变及 BBAC-ES 协调

控制策略可以进一步进行研究。

参 考 文 献:

- [1] 郑军铭,冯丽,蔡志远,等. 基于 IMPMMS 并网的新能源电压稳定性分析[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(3): 66.
ZHENG Junming, FENG Li, CAI Zhiyuan, et al. Voltage stability analysis of new energy based on IMPMMS grid connection[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 66.
- [2] MA Y, LI Y P, HUANG G H. Planning China's non-deterministic energy system (2021 - 2060) to achieve carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2023(334): 120673.
- [3] 赵玲霞,王兴贵,丁颖杰,等. 基于三端柔性直流的光热储能站与新能源场站功率协同控制策略[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 131.
ZHAO Lingxia, WANG Xinggui, DING Yingjie, et al. Power coordinated control strategy of concentrating solar power with thermal storage and new energy stations integrated by three-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 131.
- [4] 李铁,李正文,杨俊友,等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622.
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3622.
- [5] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893.
- [6] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2.
- [7] 李海啸,程强,周林,等. 大型可再生能源电站系统电压分布式非凸优化方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(22): 7399.
LI Haixiao, CHENG Qiang, ZHOU Lin, et al. Distributed non-convex optimization method for system-wide voltage of large-scale renewable energy power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7399.
- [8] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-pene-

tration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9.

[9] 董萍, 徐良德, 刘明波. 多站点无功补偿装置的多目标协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 587.

DONG Ping, XU Liangde, LIU Mingbo. Multi-objective coordinated control of reactive compensation devices among multiple substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 587.

[10] 张莉, 高岩, 朱红波, 等. 考虑用电量不确定性的智能电网实时定价策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3622.

ZHANG Li, GAO Yan, ZHU Hongbo, et al. Real-time pricing strategy based on uncertainty of power consumption in smart grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3622.

[11] 吴志强, 高岩, 王波. “负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 65.

WU Zhiqiang, GAO Yan, WANG Bo. Real-time pricing strategy for the smart grid under “load-utility” two-level balance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 65.

[12] 冯志颖, 唐文虎, 吴青华, 等. 考虑负荷纵向随机性的用户用电行为聚类方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 39.

FENG Zhiying, TANG Wenhui, WU Qinghua, et al. Users’ consumption behavior clustering method considering longitudinal randomness of load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 39.

[13] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs—A new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552.

[14] 尹发根, 王淳. 电力弹簧研究进展: 原理、拓扑结构、控制和应用[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 179.

YIN Fagen, WANG Chun. Review of electric spring: principle, topologies, control and applications[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 179.

[15] ZHANG S, QIU D. Study on the characteristics of electric spring with nonlinear load[C]// 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22 – 26, 2016, Hefei, China. 2016: 3284 – 3289.

[16] CHEN X, HOU Y, HUI S Y R. Distributed control of multiple electric springs for voltage control in microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(3): 1353.

[17] SHUO Y, TAN S C, LEE C K, et al. Electric spring for power quality improvement[C]// 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014, March 16 – 20, 2014, Fort Worth, Texas, USA. 2014: 2140 – 2147.

[18] MOK K T, TAN S C, HUI S Y R. Decoupled power angle and voltage control of electric springs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(2): 1218.

[19] YAN S, LEE C K, YANG T, et al. Extending the operating range of electric spring using back-to-back converter: Hardware implementation and control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(7): 5176.

[20] 刘闯, 陈皓楠, 韩子娇, 等. 用于分布式电压调控的 AC-AC 型主动电力弹簧[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 740.

LIU Chuang, CHEN Haonan, HAN Zijiao, et al. AC-AC based active electric spring (AC-AES) for distributed voltage regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 740.

[21] AHMED H F, CHUNG C H, KHAN A A, et al. Nondifferential AC choppers based identical bipolar Buck-Boost AC-AC converter without commutation issue[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(4): 4995.

[22] 王青松. 电力弹簧若干关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

[23] 赵永熹, 张家领, 程启明. 三相电力弹簧的无源控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(3): 110.

ZHAO Yongxi, ZHANG Jialing, CHENG Qiming. Passivity-based control strategy of three-phase electric springs[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 110.

[24] 陈皓楠. AC-AC 型主动电力弹簧及其负荷侧电压控制[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.

(编辑:刘素菊)