

# Control Strategy of Energy Storage Application Based on Operation Characteristics of Low Voltage Distribution Area

Bin Yi<sup>1</sup>, Chonggan Liang<sup>1</sup>, Wei Zhao<sup>2</sup>, He Zhao<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>Hunan University, Changsha Hunan

Email: yb0702dky@foxmail.com

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In order to improve the power quality problems such as three-phase unbalance and low voltage of low-voltage distribution network caused by load fluctuation, the energy storage application of the distribution network side is promoted according to local conditions, and its application value on the distribution network side is exerted. Considering the operating characteristics of the low-voltage power distribution station area, the energy storage system control strategy applicable to the low-voltage power distribution station area is proposed. Through the phase-separated control of the energy storage system, the effect of improving the power supply characteristics of the distribution network is realized. Finally, a simple distribution network model is taken as an example to verify the simulation. The results show that the control strategy of the energy storage system in the low-voltage distribution area has strong feasibility and effectiveness.

## Keywords

Distributed Energy Storage, Low-Voltage Distributed Network, Application Mode, Operation Control

---

# 基于低压配电台区运行特性的储能控制策略

易 斌<sup>1</sup>, 梁崇淦<sup>1</sup>, 赵 伟<sup>2</sup>, 赵 赫<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州

<sup>2</sup>广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州

<sup>3</sup>湖南大学, 湖南 长沙

Email: yb0702dky@foxmail.com

收稿日期：2020年6月6日；录用日期：2020年6月21日；发布日期：2020年6月28日

## 摘要

为改善因负荷波动带来的低压配电网三相不平衡和低电压等电能质量问题，因地制宜推进配电侧储能应用，充分发挥其在配电网侧的应用价值。考虑低压配电台区运行特性，提出适于低压配电台区的储能系统应用控制策略，通过对储能系统的功率控制，实现其改善配电网供电质量的效果。最后，以简单配电网模型为例进行仿真验证，结果表明，所提低压配电台区储能系统控制策略具有可行性和有效性。

## 关键词

分布式储能，低压配电网，应用模式，运行控制

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

配电网是国民经济和社会发展的重大公共基础设施，随着以“智能电网”和“泛在电力物联网”为基础的“三型两网”战略目标的提出，利用智能设备保障配电网供电质量的重要性日益凸显。在低压配电网中，配电台区供电电能质量和供电可靠性直接影响着居民正常生产、生活。实际上，《电力发展“十三五”规划(2016~2020年)》也早已明确提出要升级改造配电网，推进智能电网建设，满足用电需求，提高供电质量，并着力解决配电网薄弱问题。

低压配电台区是配电网的重要节点设备，其运行特性直接关系到用户侧电能质量，由于负荷波动等原因导致的配电台区过载或不平衡运行问题，是配电网供电质量的主要问题之一。传统一般采用装设调压平衡装置、对变压器进行扩容升级、新建改造等方式改善配电台区运行状况，这些手段往往只能解决单一问题，且实施周期长，容易造成设备利用率低、电网投资效益差等问题。储能作为一种新兴的解决方案，其发展快速、成本不断下降，可提供削峰填谷、无功支撑等功能，发挥改善电能质量、延缓配电设备扩容升级等作用[1] [2]。实际上，国内外已对储能系统在配电网中的应用进行了广泛研究[3]-[14]。但目前的研究主要集中在储能选址定容和接入储能后潮流优化控制方面。文献[9]从经济性角度对储能系统容量配置进行分析，文献[10]基于储能系统在配电网各应用场景的经济价值建立了储能优化配置模型，文献[11]提出结合遗传算法和二次规划的方法对储能系统进行优化规划与配置，文献[12]提出了对不同分布式储能系统的容量配置和接入位置优化方法，这些方法对配电网储能优化配置和接入选址提供了很好指导原则。文献[13]采用 Benders 分解方法实现储能系统对电网各点电压的优化控制，文献[14]给出了配网多点分散储能系统协调控制策略，实现对配网馈线潮流的优化。以上研究均未针对配电台区常见的配变重过载、三相不平衡、电压越限等问题进行统筹考虑，未根据台区负荷特性给出对应的优化控制策略及解决方案。

为此，本文结合低压配电网实际情况，对低压配电台区储能系统应用控制关键技术进行研究，提出适于低压配电台区应用储能系统的结构设计与控制策略，通过仿真分析验证该结构设计的有效性

策略的可行性，为促进配电网侧储能应用发展，提升配电台区供电可靠性和供电电能质量提供指导。

## 2. 考虑配电台区运行特性的储能系统应用

配电网是电网各领域中直接关联用户的重要环节，具有覆盖面积广、运行工况复杂的特点，配电台区作为其重要设备，是连接电网和用户的重要枢纽，考虑低压配电台区运行特性，对解决配电网供电质量问题具有重要意义。

实际上，配电网台区变压器运行面临众多问题，主要有：1) 台变已面临重载或处于重载运行中(部分用户负荷已采取错峰用电措施，否则台变重过载，影响电网运行安全)；2) 生产用电负荷启停对台区有较强冲击性，会造成低电压投诉；3) 台区馈线实际三相电压不平衡超过基准值，引起电能质量问题；4) 台区计划新增台变进行负荷拆分，但投资受限。具体公用台变日负荷曲线如图 1 所示。

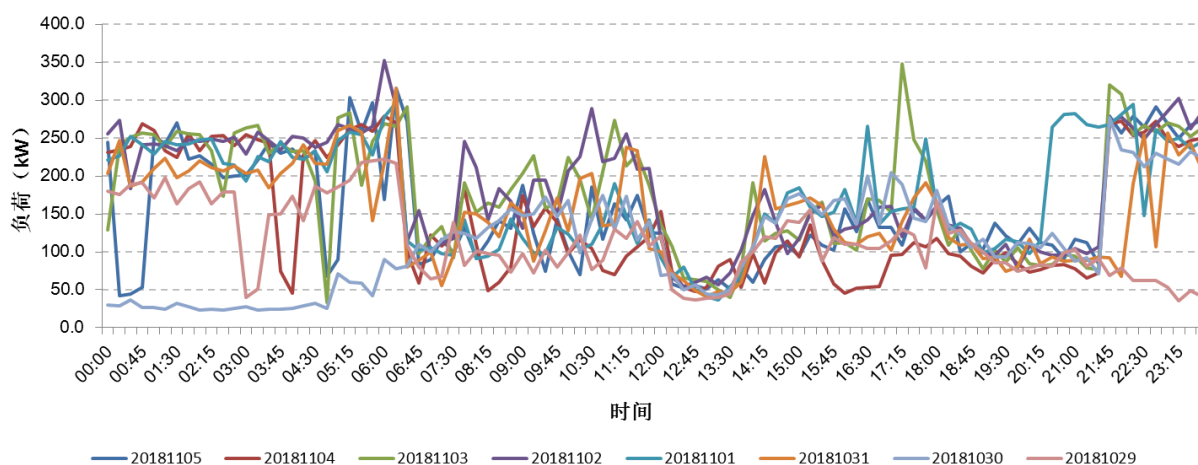


Figure 1. Typical load curve of a public low voltage distribution area in 2018

图 1. 某公用台变 2018 年典型日负荷曲线

基于配电台区变压器运行所面临的问题，对台变运行特性进行分析，以寻求优化解决方案，本文主要从有功功率和无功功率两方面进行考虑。有功功率方面，我国配电网通常采用三相四线制接线方式，而单相负荷、非线性负荷不断增长，造成配电台区三相有功不平衡运行现象时有发生，并直接导致线路损耗加大、台区运行不经济。利用储能系统进行有功功率的充放电控制，实现电能的时空平移，对短时波动负荷进行“削峰填谷”，从而有效改善配电网三相不平衡运行状况。

无功功率方面，电网中无功电源所发出的无功功率与无功负荷及电网中的无功损耗平衡直接影响着电压状况。当配电网出现无功不足时，就会出现低电压或损耗增大的情况，而这也是影响配电网供电质量的主要因素之一。实际上，通常，电网中无功补偿会依据变电站的电压等级进行对应配置，一般来说，电压等级越高，所配置无功补偿容量比越高。而在低压配电网中，10 kV 等级线路或台区的电容器安装容量较小，仅为配电变压器安装容量的 0.05~0.1，因此低压配电网中的无功补偿配置容量较低；此外，为避免线路“轻载”时导致供电电压过高，配备容量会进一步减少，因而，无功功率会由高压等级向下一等级进行流动以实现其无功补偿效果，这也造成大量无功在配电网中流动。实际上，配电网线路低电压多是由短时段负荷增大而导致的电压跌落，该问题通过加装传统电容器无法解决的问题。可通过利用储能系统进行无功功率的充放电控制，从而实现其无功补偿作用。

针对配电网台区运行所存在的系列问题，储能系统在配网中的运行控制直接关系其应用效果。基于配电台区的有功、无功运行特性，结合储能系统方案设计，利用储能参与其三相不平衡治理和无功补偿作用，以其优化控制来充分发挥储能的各项技术优势，实现对配电网电能质量的改善目的。

### 3. 储能系统结构与控制策略

#### 3.1. 主拓扑结构设计

考虑配网中低压配变台区运行特性，针对储能双向变流器提出如图 2 所示拓扑结构，控制实现储能系统对交流输出侧各相有功、无功的分相调控。

由图 2 知，储能双向变流器主要包括 DC/AC 变换器和单相隔离变压器等。其中，DC/AC 变换器采用三个独立单相全桥电路结构。储能系统通过三个单相隔离变压器接入电网，并通过实时跟踪检测并网点电压、电流，主动跟踪配电台区或线路的运行情况。通过电流互感器实时监测负载电流，装置进行电压电流信号采样，通过零线电流、相电流分析线路是否处于三相不平衡状态，同时计算达到三相平衡状态时各相所需转换的电流值，将信号发送给储能系统逆变器装置驱动，从而达到三相负载电流平衡控制或无功补偿的目的。

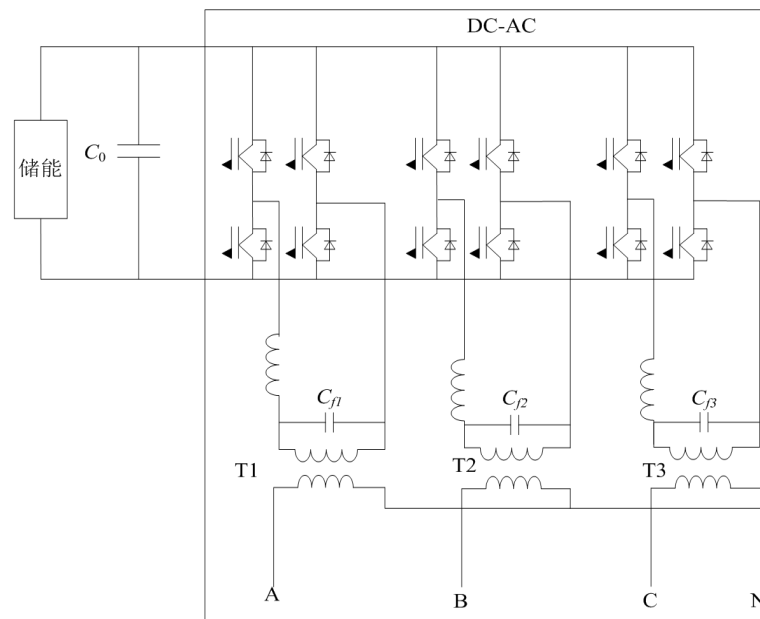


Figure 2. Topology structure diagram of the converter

图 2. 变流器系统拓扑结构图

#### 3.2. 控制策略设计

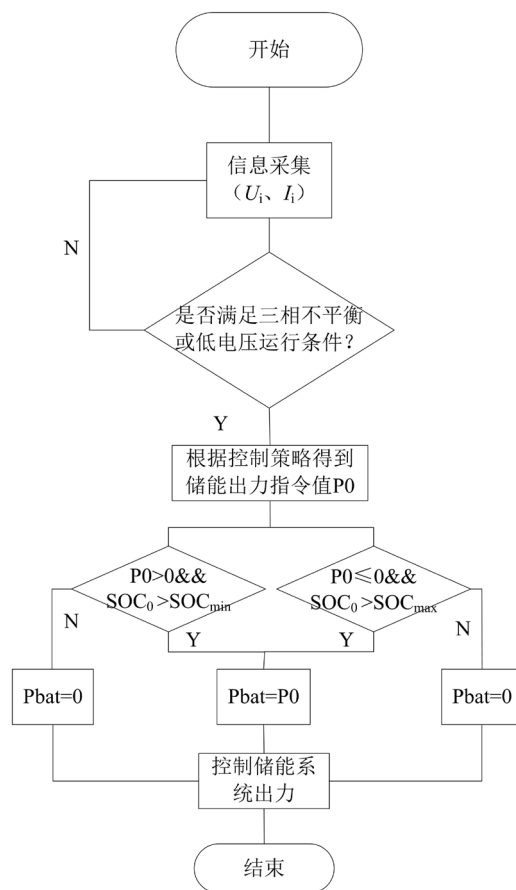
配电台区储能系统实时监测台变负载情况，当负载率超过所设阈值时，储能系统发出有功/无功功率，降低台变负载率，从而提高其运行安全性。具体控制策略如图 3 所示。

步骤 1：通过采集电网 PCC 点电压、电流信号，判断是否发生三相不平衡、是否发生功率因数偏低或电压偏低的问题；

步骤 2：根据步骤 1 所得到判定结果，选择储能系统控制策略；判断是否达到三相不平衡补偿或低电压补偿触发条件，若触发分相计算出调节三相不平衡或低电压需要补偿的有功、无功值( $P_0$ ,  $Q_0$ )；

步骤 3：将根据储能系统控制策略得到所需储能系统的充放电功率值( $P_0$ ,  $Q_0$ )，结合储能系统目前荷电状态判断得到储能系统出力指令( $P_{bat}$ ,  $Q_{bat}$ )：

- 1) 当  $P_0 > 0$  时，若  $SOC_0 > SOC_{min}$ ，则令  $P_{bat} = P_0$ ， $Q_{bat} = Q_0$ ；否则  $P_{bat} = 0$ ， $Q_{bat} = 0$ ；
- 2) 当  $P_0 \leq 0$  时，若  $SOC_0 \leq SOC_{max}$ ，则令  $P_{bat} = P_0$ ， $Q_{bat} = Q_0$ ；否则  $P_{bat} = 0$ ， $Q_{bat} = 0$ ；

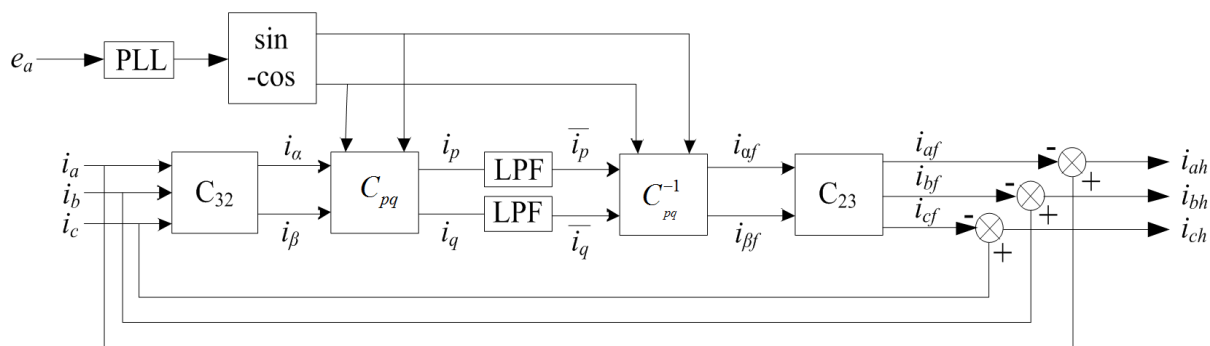


**Figure 3.** Control strategy process of the power quality management based on energy storage system  
**图 3.** 储能系统综合治理电能质量控制策略流程

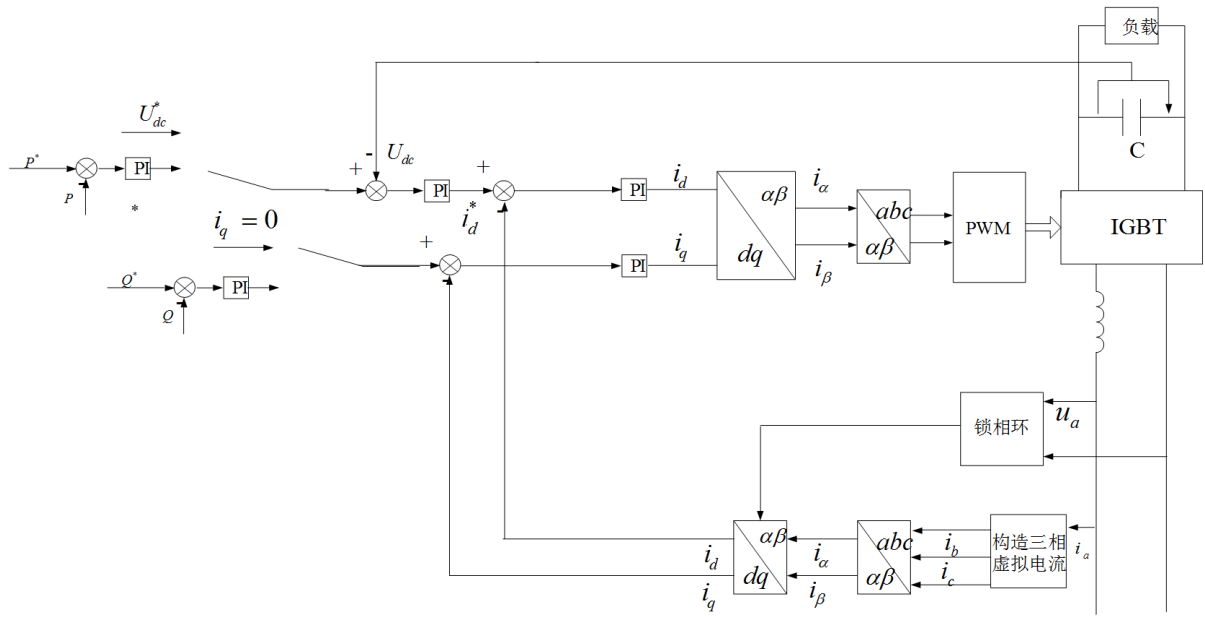
步骤 4: 根据步骤 3 中所得到的储能系统充放电功率出力指令值, 得到各相 PWM 驱动波形, 通过 PCS 控制实现对储能电池充放电控制;

步骤 5: 根据电网 PCC 点运行信息判断是否达到储能系统运行模式控制的截止条件(即对应阈值), 若达标即停止充放电过程, 返回步骤 1; 若未达标, 返回步骤 2, 储能系统继续充放电。

该控制策略中通过监测并网点电压、电流情况进行间接测量分析判断低电压及三相不平衡工况。具体基于  $i_p$ - $i_q$  检测法检测谐波电流的原理如图 4 所示, 双闭环控制原理如图 5。



**Figure 4.** Schematic diagram of  $i_p$ - $i_q$  monitoring  
**图 4.**  $i_p$ - $i_q$  监测原理图



**Figure 5.** Model of the double closed-loop control  
**图 5.** 双闭环控制模型

图 4 中  $i_p$ - $i_q$  检测法工作过程为：根据相关坐标变换理论得到  $p$ 、 $q$ ，经低通滤波器 LPF 得  $p$ 、 $q$  的直流分量  $p$ 、 $q$ 。在电网电压波形无畸变时， $p$  为基波有功电流与电压作用产生， $q$  为基波无功电流与电压作用产生，因此，可由  $p$ 、 $q$  通过反变换计算出被检测电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的基波分量  $i_{af}$ 、 $i_{bf}$ 、 $i_{cf}$ 。再将  $i_{af}$ 、 $i_{bf}$ 、 $i_{cf}$  与  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  相减，即可得  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  的谐波分量  $i_{ah}$ 、 $i_{bh}$ 、 $i_{ch}$ 。其中， $C_{23}$  为  $C_{32}$  的逆矩阵； $C_{pq}^{-1}$  为  $C_{pq}$  的逆矩阵

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$C_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$C_{23} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \tag{3}$$

该检测方法以瞬时有功功率、瞬时无功功率或瞬时有功电流、瞬时无功电流的分解为基础，检测精度高、延时小、动态特性好。

此后，控制环节采用检测电路环节的电感电流作为电流内环，输出电容反馈回的电压作为电压内环，形成电流内环，电压外环的双闭环控制。

#### 4. 仿真与分析

为验证上述储能系统方案与控制策略的可行性和有效性，构建含 100 kW/300 kWh 低压配电网模块化



储能系统的简单电网仿真模型，系统线电压有效值为 380 V (即单相对地电压有效值为 220 V，其他参数见具体算例)，具体如图 6 所示。

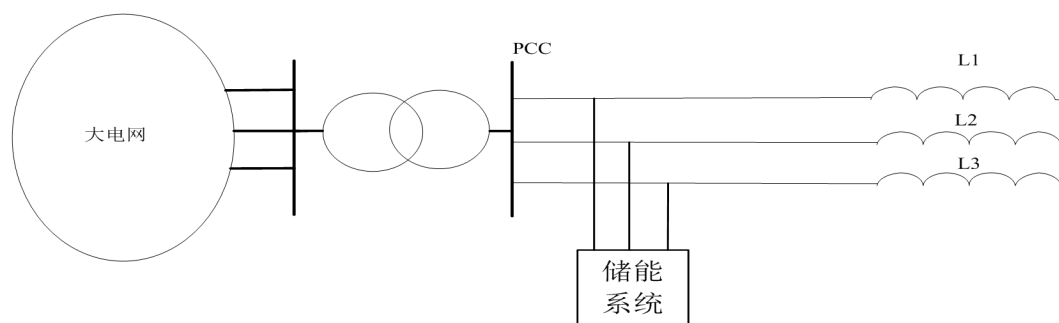


Figure 6. Model of the power grid with energy storage system

图 6. 含储能系统电网模型

考虑低压配电台区运行特性的储能系统应用时，利用三个单相全桥构成 PCS 的逆变器结构，控制储能系统的充放电过程，并分别从三相不平衡抑制、无功补偿两方面进行仿真验证与分析。

#### 4.1. 储能系统的充放电仿真实验

为验证本文设计拓扑结构的可行性，对储能系统充放电转换过程进行仿真分析。储能以 50 kW 进行充电，0.3 s 切换为 100 kW 进行放电的仿真，各相电压电流变化情况：

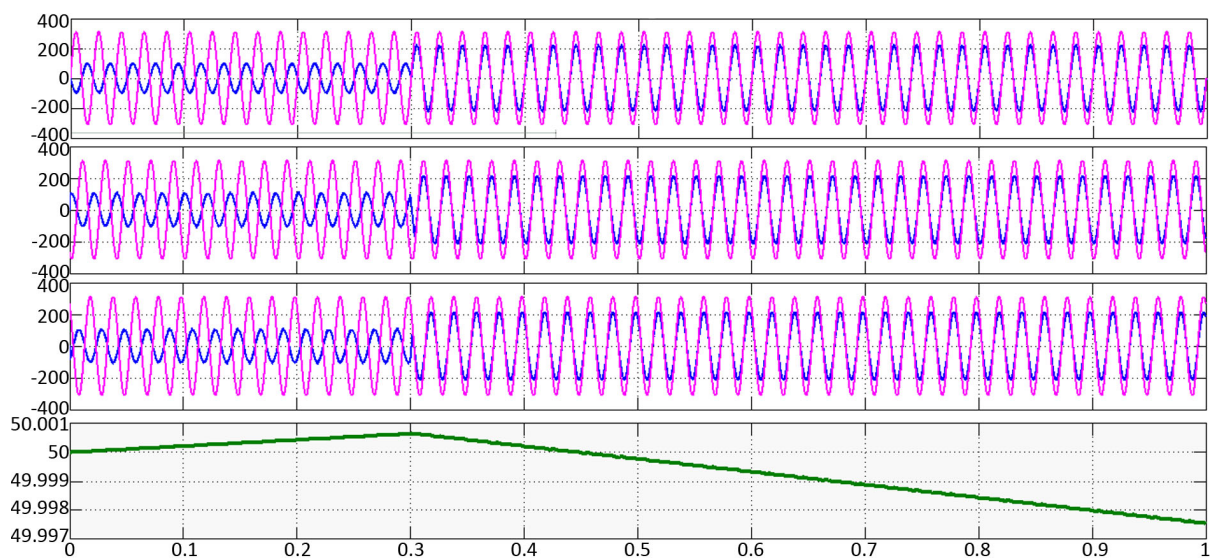


Figure 7. Three-phase voltage and current during the charge and discharge conversion

图 7. 三相电压电流充放电转换过程

由图 7 知，储能系统以 50 kW 进行充电，并以额定功率进行放电试验，在 0.3 s 时，储能系统由 50 kW 充电的状态切换 100 kW 放电的状态，该切换控制过程在一个周期内完成，且各相均正常完成状态切换该过程，储能系统 SOC 先增大后减小，储能系统动作过程正确且有效，且控制出力的精度偏差低于 6.36%。

#### 4.2. 不平衡治理仿真

为验证单相全桥构成的 PCS 结构可通过有功功率的充放，实现三相电路的不平衡抑制功能，利用简

单电网出现三相不平衡负荷工况，并在 0.05 s 时投入储能，对储能作用前后的动态仿真结果进行分析说明。

设置三相负载不对称，其中线路 L1 参数(10  $\Omega$  + 0.05 H)，线路 L2 参数(5  $\Omega$  + 0.1 H)，线路 L3 参数(4 $\Omega$ +0.1H)，仿真结果如图 8 所示：

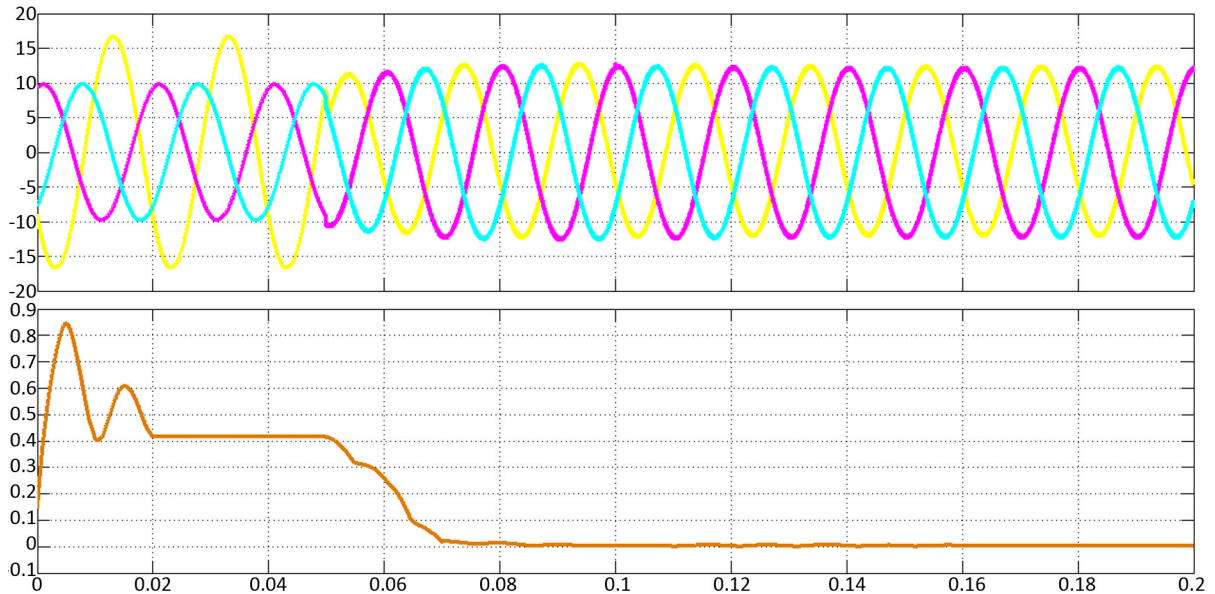


Figure 8. Three-phase current and imbalance simulation waveform with energy storage

图 8. 含储能的三相电流及不平衡度仿真波形

由图 8 知，储能投入前线路 L1、L2、L3 对应电路中 A、B、C 三相，线路阻抗分别为 $|Z_{L1}| = 18.6$ 、 $|Z_{L3}| = 31.8$ 、 $|Z_{L2}| = 31.6$ ，相对应电流幅值分别为 16.25 A、10 A、10 A，三相电流不平衡情况显著，电网三相不平衡度为 0.4。0.05 s 时投入储能，将原本不平衡的三相电流进行补偿或抑制，经过一个周期作用，不平衡度补偿至 0 附近，可有效降低其运行不平衡度，实现电网三相电流平衡。

### 4.3. 无功补偿仿真实验

为验证单相全桥构成的 PCS 结构可通过无功功率充放控制，实现三相电路的无功补偿，从而改善配电网因无功不足而导致的低电压或损耗大等问题的效果，利用电网的无功不平衡工况，对有无储能作用、储能作用前后的动态仿真结果进行对比说明。

设置三相负载对称，其中线路 L1、L2、L3 参数均为(10  $\Omega$  + 0.1 H)，对储能系统作用前后进行无功补偿实验仿真对比分析，其中，图 9~10 为不含储能和含储能作用时 C 相电压电流情况(限于篇幅，仅单独列出 C 相电压电流曲线)。

由图 9 知，在不含储能作用的电网时，由于负荷中感性阻抗较大，导致线路中电压电流相位出现较大的偏移，即电压电流不同相位，电网中无功负荷较大。

由图 10 知，在含储能作用的电网时，电压电流相位偏移为零，即电压电流同相位，储能可实现对应无功补偿作用。

同理，为观察储能动态投入对电网的无功补偿的效果，设置 0.05 s 时在不含储能的电网中投入储能参与无功补偿作用，图 11 为 0.05 s 时在不含储能的电网中投入储能后三相电压电流动态变化过程。



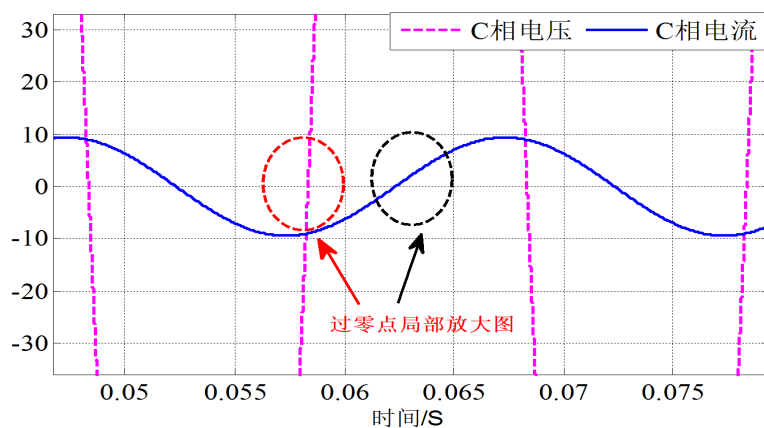


Figure 9. Voltage and current waveform of C-phase without energy storage system  
图 9. 不含储能时 C 相电压电流放大波形

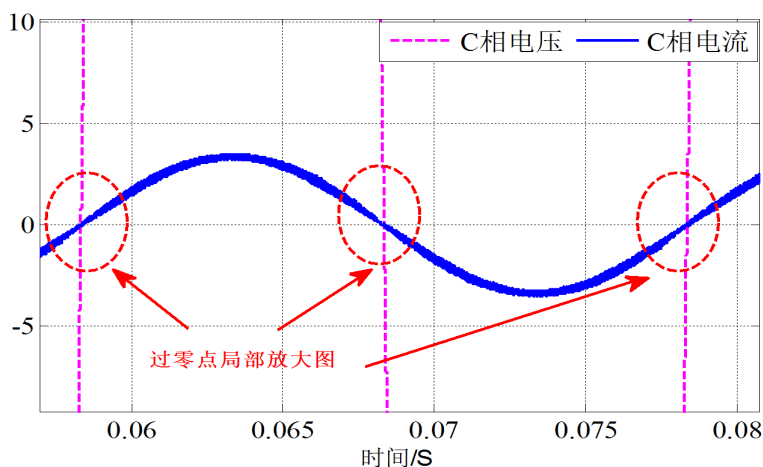


Figure 10. Voltage and current waveform of C-phase with energy storage system  
图 10. 含储能时 C 相电压电流放大波形

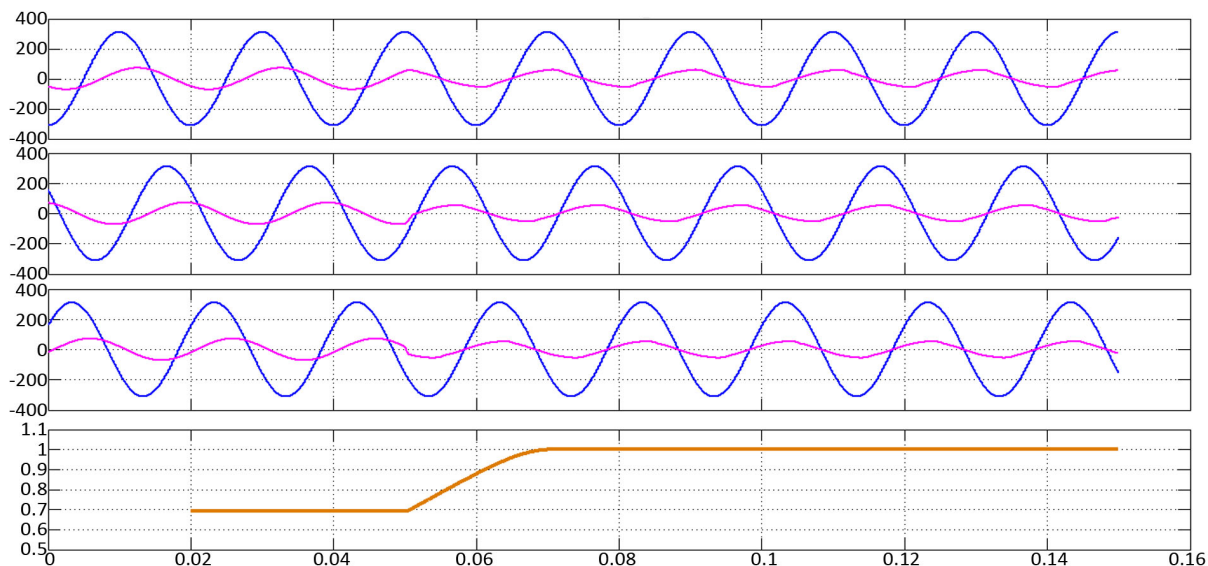


Figure 11. Three-phase current and power factor simulation waveform with energy storage  
图 11. 含储能的三相电流及功率因素仿真波形

由图 11 知, 仿真过程中, 0.05 s 之前(即储能投入前), 由于负荷中感性阻抗较大造成的线路中电压电流相位偏移较大且电网功率因数较低为 0.7, 感性无功为 24 kVar; 0.05 s 时投入储能进行无功补偿, 并提供容性无功为 24 kVar, 一个周期后, 电网功率因数提高至 1, 电压电流实现相位一致, 储能系统的无功补偿动作正确有效。

## 5. 结论

本文低压配电台区运行特性, 针对台区台变负载率控制和电能质量治理等应用需求, 提出基于三相分立式双向变流器的电化学储能系统结构“一主多辅”运行控制策略, 并进行仿真验证, 主要结论如下:

1) 基于三相分立式双向变流器的电化学储能系统可实现分相独立控制, 增加了储能系统运行控制条件自由度, 可有效改善台区负荷不均引起的三相不平衡和无功不足引起的低电压问题。

2) 电化学储能系统可通过四象限灵活调节, 通过主动吸收或发出有功和无功, 可快速进行三相不平衡调节、低电压治理、功率因素改善以及缓解台变短时重过载等问题, 具备较好的应用推广前景。

## 基金项目

中国南方电网公司科技项目(GD-KJXM-20180177)。

## 参考文献

- [1] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 雷震, 惠东. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 1-9+103+10-11.
- [2] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24 (4): 1-8.
- [3] 李振坤, 李一骄, 张代红, 郁家麟. 储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3676-3683.
- [4] 沈通. 考虑配电网分布式电源可靠性的储能技术应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [5] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 韩轩. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.
- [6] 茆美琴, 刘云晖, 张榴晨, 张健. 含高渗透率可再生能源的配电网广义储能优化配置[J/OL]. 电力系统自动化:1-9 [2019-03-18].
- [7] Sutanto, D. (2002) Energy Storage System to Improve Power Quality and System Reliability. *Student Conference on Research and Development*, Shah Alam, 17-17 July 2002, 8-11. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2002.1033042>
- [8] Lee, S.J., Kim, J.H., Kim, C.H., et al. (2016) Coordinated Control Algorithm for Distributed Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage and Frequency Deviations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7, 1713-1722. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2429919>
- [9] 吴善进, 崔承刚, 杨宁, 陈辉. 融资租赁模式下储能电站项目的经济效益与风险分析[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1217-1225.
- [10] 王守相, 王凯, 赵歌. 平抑有源配电网功率波动的储能配置与控制方法研究综述[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 1188-1195.
- [11] Nourai, A., Kogan, V.I. and Schafer, C.M. (2008) Load Leveling Reduces T & D Line Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23, 2168-2173. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.921128>
- [12] 李振文, 颜伟, 刘伟良, 等. 变电站扩容和电池储能系统容量配置的协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 89-96.
- [13] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 杨为群, 刘梦怡, 朱文广. 考虑储能调节的主动配电网有功——无功协调运行与电压控制[J/OL]. 电力系统自动化:1-8 [2019-03-18].
- [14] Carpinelli, G., Cetli, G., Mocci, S., et al. (2013) Optimal Integration of Distributed Energy Storage Devices in Smart Grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4, 985-995. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2231100>