具备不平衡电压补偿功能的台区储能装置控制策略

李娟[1],魏亚龙[2],张世乾[2],龚培娇[2]
(1.许继集团有限公司,河南 许昌 461000;
2.西安许继电力电子技术有限公司,陕西 西安 710075)

摘要:设计了一种具备电网电压不平衡补偿功能的三相四线制储能型低电压治理装置。首先,针对台区电网末端低电压问题,设计了一种有功-电压下垂和恒定功率因数相结合的控制方法,补偿了台区电网末端电压。其次,针对电网三相电压不平衡问题,提出了一种基于负序和零序虚拟阻抗的三相不平衡电压补偿方法,直接控制负序和零序电压,省略了负载电流传感器。最后,搭建Matlab/Simulink仿真模型和50 kW中点电容式三相四线制T型三电平储能变流器实验平台,通过仿真和实验验证了所提控制方案的有效性。

关键词:三相四线制;低电压治理;电网电压不平衡治理;负序和零序虚拟阻抗
中图分类号:TM464 **文献标识码**:A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd24967

Control Strategy for Energy Storage Devices in Substation Areas with Unbalanced Voltage Compensation Function

LI Juan[1], WEI Yalong[2], ZHANG Shiqian[2], GONG Peijiao[2]
(1. *XuJi Group Co., Ltd., Xuchang* 461000, *Henan*, *China*;
2. *Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an* 710075, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: A three-phase four-wire energy storage type low-voltage control device with the function of grid voltage unbalance compensation was designed. Firstly, a control method based on active voltage droop and constant power factor was introduced in detail to solve the problem of low voltage at the terminal of substation area power grid, which can compensate the low voltage at the terminal of substation area power grid. Secondly, a three-phase unbalance voltage compensation method based on negative sequence and zero sequence virtual impedance was proposed, which directly controls negative sequence and zero sequence voltage and omits the application of current sensor. Finally, a Matlab/Simulink simulation model and a 50 kW mid-point capacitor three-phase four-wire T-type three-level energy storage converter experiment platform were built, and the effectiveness of the proposed control scheme was verified through simulation and experiments.

Key words: three-phase four-wire; low-voltage control; grid voltage unbalance control; negative sequence and zero sequence virtual impedance

随着社会经济的发展,台区电力负荷日益提升并呈现出季节性特征,现有的配电网络会出现线路末端电压偏低、电压不平衡等问题,严重影响用户体验。

文献[1]提出一种基于静止无功补偿器的低电压治理方式,可实现线路阻抗呈感性条件下的电压补偿,但针对线路呈现为阻性特点的台区电网治理效果不理想。文献[2-3]给出了一种基于负载电流检测的不平衡电压治理方案,通过对负载不平衡电流进行补偿,实现三相电压的平衡。但该方案只能安装在台区首端检测三相负载电流,无法兼顾台区末端低电压。

考虑到传统方案在台区电网领域的不足,本文设计了一种储能型的低电压治理装置,针对台

作者简介:李娟(1982—),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为特高压直流输电产品测试技术,Email:lj_01234@126.com
通讯作者:魏亚龙(1991—),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为微网中接口变换器控制技术,Email:wei_yal@163.com

区电网末端电压低的问题,实时将电网电压实际值和补偿设定值进行比较,利用注入有功和无功功率的方式实现台区电网末端低电压的抬升;针对台区电网末端三相电压不平衡问题,采用负序和零序电压控制,抑制并网点电压负序和零序成分。进一步地,考虑到装置容量有限,无法完全消除负序和零序成分,且台区电网末端电压强度随负荷的变化而变化,尤其是夜间,台区负荷最小,台区电网强度最高,此时由于负序和零序电压环的存在,势必会导致装置过载保护,因此本文在负序电压和零序电压控制环基础上引入虚拟阻抗,相当于在装置和电网之间引入了阻抗,降低电网不平衡度的同时,确保了台区在夜间电网强度增强时依然能够稳定运行。

1　三相四线制储能型低电压治理装置拓扑

如图1所示,三相四线制储能型低电压治理装置拓扑采用中点电容式T型三电平三相四线制逆变器拓扑。T型三电平直流侧中点O和交流侧滤波电容中点N连接,同时和台区电网的N线相连接。该拓扑相比四桥臂三相四线制拓扑,具有成本低、控制方法简单的优点,在电能质量治理领域得到了广泛应用。图中,L_1为逆变侧滤波电感;L_2为网侧滤波电感;C_f为滤波电容组;Z_g为电网等效阻抗;i_{La},i_{Lb},i_{Lc}为电感电流;i_a,i_b,i_c分别为三相并网电流;u_{ga},u_{gb},u_{gc}为三相电网相电压。

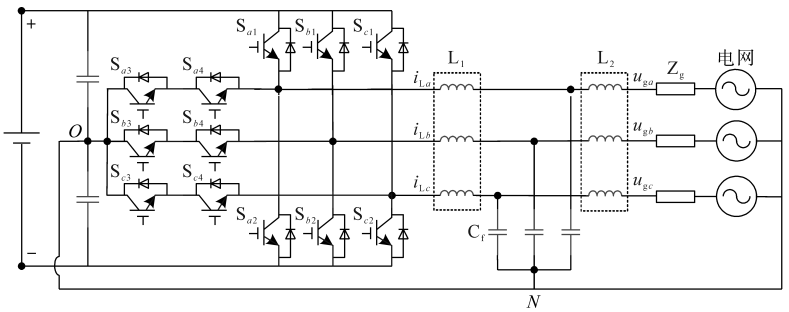


图1　三相四线制储能型低电压治理装置拓扑结构

Fig.1　Topology structure of three-phase four-wire energy storage low-voltage control device

台区电网末端低电压和三相不平衡问题最为显著,因此,工程上通常将低电压治理装置配置于电网末端,如图2所示。

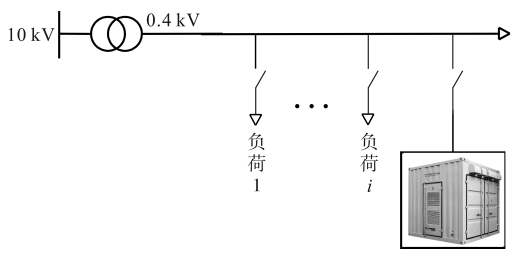


图2　三相四线制储能型低电压治理装置接入方案

Fig.2　Connection scheme of three-phase four-wire energy storage low-voltage control device

2　低电压治理方案

治理“低电压”的工作原理就是当配电台区用户端电压低于正常电压时,低电压治理装置自动检测并会按设定系数放电,输出无功功率来提升用户端电压直到满足合格水平。在台区用户端电压达到正常范围时,储能装置从放电模式切换到充电模式。

低电压治理策略如图3所示,图中,P_{lim}为有功功率限值,Q_{lim}为无功功率限值。

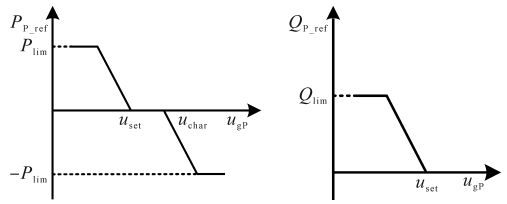


图3　低电压治理策略

Fig.3　Control strategy of low voltage control

根据电网电压正序分量的幅值u_{gP},由下式可得到正序有功功率指令P_{P_ref}:

$$P_{P_ref}=\begin{cases}k_p(u_{gP}-u_{set}) & u_{gP}<u_{set}\\ k_p(u_{gP}-u_{char}) & u_{gP}>u_{char}\end{cases} \tag{1}$$

式中:k_p为有功补偿系数。

根据式(1),当u_{gP}小于电网电压补偿目标设定值u_{set}时,低电压治理装置放电,当u_{gP}大于电网电压允许充电设定值u_{char}时,低电压治理装置充电。

由下式得到正序无功功率指令Q_{P_ref}:

$$Q_{P_ref}=\begin{cases}k_p k_{pf}(u_{gP}-u_{set}) & u_{gP}<u_{set}\\ 0 & u_{gP}>u_{char}\end{cases} \tag{2}$$

按照设定功率因数k_{pf},低电压治理装置输出感性无功,从而抬升电网电压;当u_{gP}大于电网电压允

许充电电压设定值u_{char}时,低电压治理装置充电,同时由式(2)可得Q_{P_ref}为0,低电压治理装置充电,从而降低电网电压。

3 三相不平衡电压治理方案

3.1 正负零序电流环及中点电位控制

具备负序和零序电压控制的低电压治理装置控制框图如图4所示。其中,u_{dp},u_{qp},u_{dn},u_{qn},u_z分别为电网电压正序d,q轴分量、负序d,q轴分量和零序电压;P_{P_ref},Q_{P_ref}分别为正序有功功率、无功功率指令;u_{dn_ref},u_{qn_ref},u_{z_ref}分别为负序d,q轴和零序电压指令;i_{dp_ref},i_{qp_ref},i_{dn_ref},i_{qn_ref},i_{z_ref}分别为正序d,q轴、负序d,q轴和零序电流指令;i_{Ld},i_{Lq},i_{Lz}分别为电感电流d,q轴分量、零序分量;Δu_{dc}为上、下母线电压差。

图4中,正、负序电流环采用PI和2次PR的电流内环的复合控制方法。PI调节器用于控制电感电流中经过abc/dq变换后得到的直流正序分量,2次PR调节器用于控制电感电流中经abc/dq变换后得到的二倍频交流负序分量。零序分量则采用1次PR和3次PR的零序电流环控制,其中1次PR用于跟踪基波分量,3次PR用于消除电网电压不平衡下零序电流中的3次成分。负序电压外环用于控制电网电压中的负序成分。零序电压外环用于控制电网电压中的零序成分。另外,正、负序电流环的负序电流指令$i_{n\alpha_ref}$和$i_{n\beta_ref}$为负序d,q轴电流指令i_{nd_ref}和i_{nq_ref}经过负序二倍频反Park变换得到[4]。直流侧中点电位控制采用PI控制,上、下母线电压差Δu_{dc}经PI调节器后得到零序控制量,并将其叠加到零轴,与零序电流环并联,共同实现零序电流和中点电位控制的目标[5]。

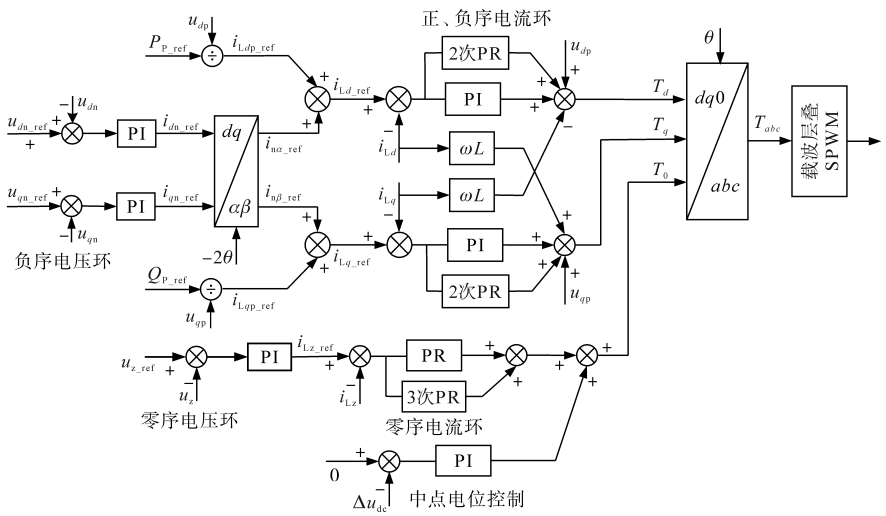


图4 具备负序和零序电压控制的低电压治理装置控制框图

Fig.4 Control block diagram of low-voltage control device with negative sequence and zero sequence voltage control

3.2 正负序分离

为实现对台区电网电压中的负序和零序电压的控制,以及实现负序和零序虚拟阻抗,需要对电压和电流进行负序和零序分量的提取[6]。以台区三相电网电压u_{abc}为例,根据对称分量法,得到正序分量为u_{abc_P},负序分量为u_{abc_N},如下式所示:

$$\begin{cases} u_{abc_P}=\dfrac{1}{3}\boldsymbol{T}^{+}u_{abc}=\dfrac{1}{3}\begin{bmatrix}1&\alpha&\alpha^2\\ \alpha^2&1&\alpha\\ \alpha&\alpha^2&1\end{bmatrix}u_{abc} \\ u_{abc_N}=\dfrac{1}{3}\boldsymbol{T}^{-}u_{abc}=\dfrac{1}{3}\begin{bmatrix}1&\alpha^2&\alpha\\ \alpha&1&\alpha^2\\ \alpha^2&\alpha&1\end{bmatrix}u_{abc}\end{cases} \tag{3}$$

对式(3)进行$abc/\alpha\beta$坐标变换,得到α-β坐标系下的电压正、负序分量如下式所示:

$$\begin{cases} u_{\alpha\beta_P}=\boldsymbol{C}_{32}u_{abc_P}=\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{T}^{+}u_{abc}=\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{T}^{+}\boldsymbol{C}_{32}^{-1}u_{\alpha\beta} \\ \quad=\dfrac{1}{2}\begin{bmatrix}1&-m\\ m&1\end{bmatrix}u_{\alpha\beta} \\ u_{\alpha\beta_N}=\boldsymbol{C}_{32}u_{abc_N}=\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{T}^{-}u_{abc}=\boldsymbol{C}_{32}\boldsymbol{T}^{-}\boldsymbol{C}_{32}^{-1}u_{\alpha\beta} \\ \quad=\dfrac{1}{2}\begin{bmatrix}1&m\\ -m&1\end{bmatrix}u_{\alpha\beta}\end{cases} \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{C}_{32}=\begin{bmatrix}1&-\dfrac{1}{2}&-\dfrac{1}{2}\\ 0&\dfrac{\sqrt{3}}{2}&-\dfrac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}$$

$$\alpha=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi}\quad m=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$$

式(4)在提取过程中要对$u_{\alpha\beta}$进行90°延时。本文采用了全通滤波器(all pass filter,APF)的方法实现相位延时。正、负序分离控制框图如图5所示,u_α和u_β分别为电网电压α,β轴分量,u_{α_P},u_{β_P},u_{α_N},u_{β_N}分别为u_α和u_β对应的正、负序分量。

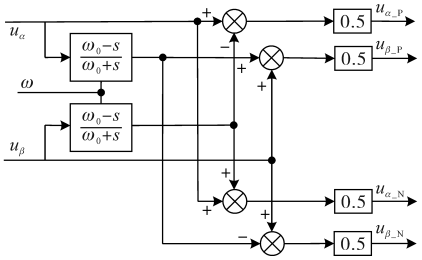


图5　正、负序分离控制框图

Fig.5　Control block diagram of positive and negative sequence separation

3.3　负序和零序虚拟阻抗方案

考虑低电压治理装置容量有限,在兼顾低电压治理的同时不可能将不平衡电压中的负序和零序分量完全消除,尤其考虑到夜间台区电网负荷降低导致并网点电压强度增强,如果采用3.1节中的负序和零序电压控制环,势必导致装置过电流故障。因此,本文通过引入虚拟阻抗,可在一定程度上降低负序电压和零序电压,降低三相不平衡度。由于虚拟阻抗的引入,使得并网点和低电压治理装置之间等效串联了负序阻抗和零序阻抗,确保装置在台区夜间电网强度增强时也能够稳定运行。另外,虚拟阻抗的取值直接关系到补偿效果,虚拟阻抗值越小,补偿效果越好,但输出电流会增大,在强网环境下系统容易不稳定。因此,在工程应用中需要根据实际场景确定虚拟阻抗值。

引入负序虚拟阻抗的负序电压如下:

$$\begin{cases} u_{dn_ref} = 0 - R_n i_{dn} + \omega L_n i_{qn} \\ u_{qn_ref} = 0 - R_n i_{qn} - \omega L_n i_{dn} \end{cases} \tag{5}$$

式中:u_{dn_ref},u_{qn_ref}为增加负序虚拟阻抗后的负序d,q轴电压参考值;R_n,L_n为负序虚拟阻抗;i_{dn},i_{qn}为负序电流d,q轴分量;ω为电网角频率。

负序虚拟阻抗控制框图如图6所示,负序d,q轴电流经过虚拟阻抗后,得到d,q轴压降Δu_{dn}和Δu_{qn},取反后得到负序d,q轴电压参考值u_{dn_ref}和u_{qn_ref}。

引入零序虚拟阻抗的零序电压如下式所示:

$$\begin{cases} u_{dz_ref} = 0 - R_z i_{dz} + \omega L_z i_{qz} \\ u_{qz_ref} = 0 - R_z i_{qz} - \omega L_z i_{dz} \end{cases} \tag{6}$$

式中:u_{dz_ref},u_{qz_ref}分别为经零序虚拟阻抗后的d,q轴电压参考值;R_z,L_z为零序虚拟阻抗;ω为电网角频率。

图7为零序虚拟阻抗控制框图,零序电流通过全通滤波器得到虚拟β轴分量,经反Park变换并增加零序虚拟阻抗,最后将压降Δu_{dz}和Δu_{qz}分量经坐标变换得到零序虚拟阻抗压降的α轴分量$\Delta u_{\alpha z}$,对其求反得到零序电压参考值u_{z_ref}。

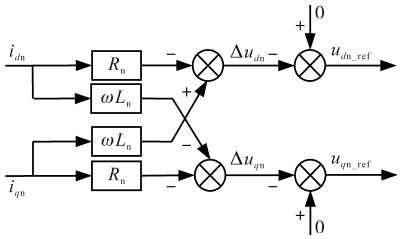


图6　负序虚拟阻抗控制框图

Fig.6　Virtual impedance control block diagram

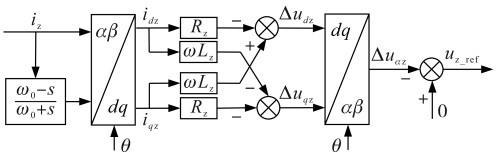


图7　零序虚拟阻抗控制框图

Fig.7　Control block diagram of zero sequence virtual impedance

4　仿真与实验验证

4.1　仿真分析

为验证低电压治理方法和基于负序、零序虚拟阻抗的不平衡电压治理方法,搭建Matlab/Simulink仿真模型并展开仿真分析,仿真参数为:直流母线电压700 V,额定线电压400 V,开关频率16 kHz,配电网线路电阻0.2 Ω,滤波电感0.25 mH,滤波电容20 μF,阻尼电阻0.5 Ω,配电网线路电感0.2 mH。

在0.3 s投入低电压治理算法,0.5 s投入不平衡电压治理算法的仿真工况下,设置配电台区本地A,B,C三相负荷分别为50 kW/10 kvar,25 kW/5 kvar,75 kW/15 kvar。

在图8a中,0.3 s前不投入低电压治理算法和不平衡电压补偿算法,三相电网相电压u_a,u_b,u_c峰值分别达到了270 V,295 V,250 V;在0.3 s投入不平衡电压补偿算法后,三相电网相电压u_a,u_b,u_c峰值分别达到了280 V,306 V,260 V;0.5 s投入低电压治理算法后,三相电网相电压u_a,u_b,u_c峰值分别达到277 V,288 V,275 V。

由图8b可知,0.3 s前不投入低电压治理算法和不平衡电压补偿算法,电网d,q轴电压正、负序分量u_{dp},u_{qp},u_{dn},u_{qn}分别为269 V,0 V,2 V和14 V,

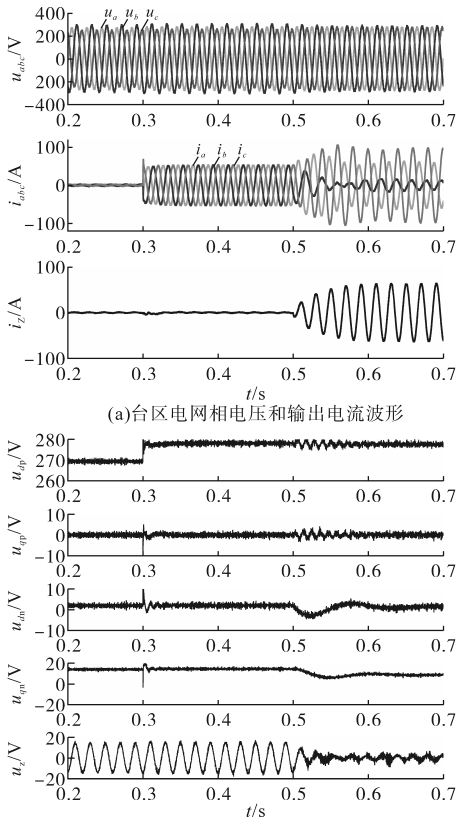


图8　不平衡电压治理仿真波形

Fig.8　Simulation waveforms of unbalanced voltage control

零序分量峰值为14 V;0.3 s投入低电压治理算法后,u_{dp},u_{qp},u_{dn},u_{qn}分别为278 V,0 V,2 V和14 V,零序分量峰值仍为14 V;0.5 s投入不平衡电压补偿算法后,u_{dp},u_{qp},u_{dn},u_{qn}分别为278 V,0 V,1 V和8 V,零序分量峰值为4 V。

综上所述,投入低电压治理和不平衡电压补偿算法后,台区电网电压得到提升并且不平衡度有所降低,验证了本文所提方法的有效性。

4.2　实验验证

本文搭建了50 kW中点电容式T型三电平RTDS实验平台,实验平台参数与仿真参数一致。配电台区三相本地负荷为3 Ω,6 Ω和9 Ω。

不平衡电压治理实验波形如图9所示,投入不平衡电压补偿算法前,三相电网电压u_a,u_b,u_c峰值分别为295 V,320 V和326 V,3.6 s投入不平衡电压补偿算法后,峰值变化为315 V,316 V和321 V。可见,不平衡电压补偿算法能有效降低三相电网电压不平衡度。

低电压治理实验波形如图10所示,投入低电压治理算法前,三相电网电压u_a,u_b,u_c峰值分别为314 V,316 V和322 V,1.15 s投入低电压治理算法后,峰值分别变化为322 V,323 V和330 V。可见,低电压治理算法能实现装置对各相电压的补偿。

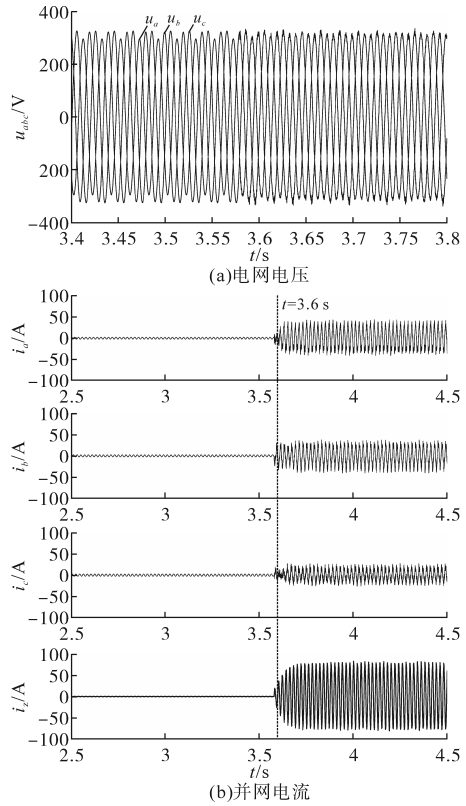


图9　不平衡电压治理实验波形

Fig.9　Experimental waveforms of unbalanced voltage control

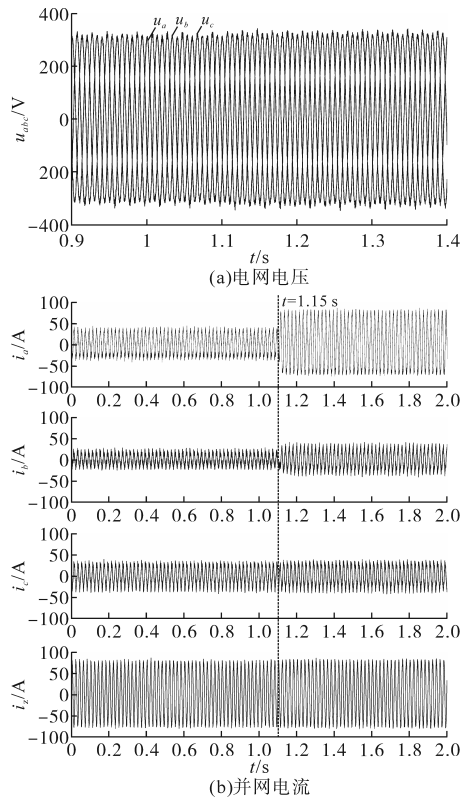


图10　低电压治理实验波形

Fig.10　Experimental waveforms of low-voltage control

5　结论

本文设计了一种储能型低电压治理装置,依托有功-电压下垂结合恒定功率因数的控制方法,有效解决了台区末端低电压问题;针对台区电网末端三相电压不平衡问题,基于负序和零序虚拟阻抗的三相不平衡电压补偿方法,对负序和零序电压直接控制。仿真和实验结果证明了所提方法的有效性。

参考文献

[1] 邓惠华,李国良,周晓明,等. 基于协调控制SVG的低压配网三相负荷不平衡治理技术[J]. 电工技术学报,2017,32(S1):75-83.
DENG Huihua, LI Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. The control technology of three-phase unbalance load in low voltage distribution networks based on coordinated controlled SVGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 75-83.

[2] 庞庆,彭琪,余祥,等. 三相四线制APF谐波检测和控制策略的研究[J]. 电力电子技术,2018,52(6):96-100.
PANG Qing, PENG Qi, YU Xiang, et al. Study of the harmonic detection and the control strategy for the apf of three-phase four-line[J]. Power Electronics, 2018, 52(6): 96-100.

[3] 李佳,王群京,张茂松,等. LCL型三相四线制APF的准比例谐振控制研究[J]. 电力电子技术,2021,55(5):4-7,77.
LI Jia, WANG Qunjing, ZHANG Maosong, et al. Research on quasi-proportional resonant control of LCL three-phase four-wire APF[J]. Power Electronics, 2021, 55(5): 4-7, 77.

[4] 王恒利,付立军,肖飞,等. 三相逆变器不平衡负载条件下双环控制策略[J]. 电网技术,2013,37(2):398-404.
WANG Hengli, FU Lijun, XIAO Fei, et al. A double-loop control srategy for three-phase inverter with unbalanced load[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 398-404.

[5] 黄新梅,王珺璨,张庆岩,等. 三相四线制三电平并网变流器中点电压研究[J]. 电力电子技术,2021,55(4):128-132.
HUANG Xinmei, WANG Juncan, ZHANG Qingyan, et al. Neutral point voltage analysis for three-phase four-wire three-level grid-connected converter[J]. Power Electronics, 2021, 55(4): 128-132.

[6] 张纯江,聂文卿,庆宏阳,等. 基于加权控制的三相四线储能逆变器输出电压不平衡抑制[J]. 电工电能新技术,2022,41(6):10-20.
ZHANG Chunjiang, NIE Wenqing, QING Hongyang, et al. Unbalance suppression for output voltage of three-phase four-wire energy-storage inverter based on weighted control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(6): 10-20.

收稿日期:2023-02-21
修改稿日期:2023-04-24

(上接第47页)

2016,29(6):125-129.

[5] 杨春燕. 电力机车与城轨车辆双制式牵引供电系统的研究[D]. 大连:大连交通大学,2009.
YANG Chunyan. The research of dual-mode traction power supply system for electric locomotive and urban rail vehicle[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009.

[6] 王志荣. 双流制列车通过中性段的供电切换方案研究[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(6):128-132.
WANG Zhirong. Power supply switching scheme for dual-current vehicle passing the pantograph neutral section[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 128-132.

[7] 晋钰,杨振龙. 交直流转换场牵引供电系统技术研究[J]. 电气化铁道,2012,23(3):20-22.
JIN Yu, YANG Zhenlong. The technique research on traction power supply system of DC-AC transformation ground[J]. Electric Railway, 2012, 23(3): 20-22.

[8] 张立伟,黄先进,游小杰,等. 欧洲主力交流传动机车主牵引系统介绍[J]. 电工技术学报,2007,22(7):186-190.
ZHANG Liwei, HUANG Xianjin, YOU Xiaojie, et al. Introduction of electrical traction system for european main AC locomotives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 186-190.

[9] 钟俊颜. 浅谈多流制电力机车主电路拓扑结构[J]. 技术与市场,2013,20(7):3-4.
ZHONG Junyan. Introduction to multiple current system of electrical locomotive main circuit topology structure[J]. Technology and Market, 2013, 20(7): 3-4.

[10] STEIMEL A. Under Europe's incompatible catenary voltages a review of multi-system traction technology[C]//2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2012: 1-8.

[11] ZHAO W, TIAN X, JIANG Q, et al. Analysis of problems during locomotive passing neutral section and novel neutral section passing scheme[C]//2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, 2018: 1-6.

收稿日期:2023-11-14
修改稿日期:2023-12-26