

多功能电压暂降治理装备控制策略研究

郑峻峰¹, 黄际元¹, 陈远扬², 胡湘伟¹

(1. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:针对电能质量问题中频繁发生的电压暂降问题,开发了一种用于用户侧电压暂降治理的多功能电压暂降治理装备。基于对系统的建模分析研究了系统在并网与离网补偿状态下的控制算法及电流谐波治理算法;通过分析传统电压暂降检测算法的特点,提出了一种电压暂降混合检测算法,该方法具有检测快速、锁相稳定的优点。基于双向晶闸管及电网电压特性研究了双向晶闸管的快速关断方法。仿真和实验结果表明,该装备能够实现电压暂降在0.2 ms内的迅速检测和工作模式的快速平滑切换,能有效地减小电压暂降问题对敏感负荷的影响,同时该装备还具备无功补偿与负载侧谐波滤除功能,具有效率高、便捷性高等优点。

关键词:电压暂降治理;三电平逆变器;并网控制;电压暂降混合检测算法;双向晶闸管

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24431

Research on Control Strategy of Multifunctional Voltage Sag Treatment Equipment

ZHENG Junfeng¹, HUANG Jiyuan¹, CHEN Yuanyang², HU Xiangwei¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Changsha Power Supply Company,

Changsha 410015, Hunan, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited,

Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the frequent voltage sag problem in power quality problems, a multifunctional voltage sag treatment equipment was developed for user-side voltage sag treatment. Based on the modeling analysis of the system, the control algorithm of the system under grid-connected and off-grid compensation states and the current harmonic control algorithm were studied. By analyzing the characteristics of traditional voltage sag detection algorithms, a hybrid voltage sag detection algorithm was proposed, which has the advantages of fast detection and stable phase-locking. The fast turn-off method of the triac was designed based on the characteristics of triac and grid voltage. Simulation and experimental results show that the device can achieve rapid detection of voltage sag within 0.2 ms, and it can realize fast and smooth switching of working modes. This can effectively reduce the impact of voltage sags on sensitive loads. At the same time, the equipment also has the functions of reactive power compensation and load-side harmonic filtering, and it has the advantages of high efficiency and high convenience.

Key words: voltage sag treatment; three-level inverter; grid-connected and off-grid control; voltage sag hybrid detection algorithm; triac

随着社会工业化和信息化程度的日益提高,电力系统在推进国家建设的进程中显得愈发重要,社会和科技的发展对供电稳定性及电能质量的要求也不断提高,建设智能化电网的重要性已经上升到国家发展战略高度^[1-2]。而现阶段随着新能源发电技术的突飞猛进,传统的电网结构发生了巨大改变,电力系统稳定性受到很大影响,这使

得电能质量问题愈加趋于复杂^[3],其中电压暂降问题成为供电可靠性问题中最为常见的问题,其对于军工、医疗等具有敏感负荷设备的行业领域,会造成较大的经济损失,甚至会引起安全事故^[4-6]。针对这一问题,一般可从电网改造、负荷改造、加装治理装备等途径进行抑制^[7]。随着储能技术的不断发展,储能型装置在电能质量治理方面的应

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A12101YJ)

作者简介:郑峻峰(1973—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电网数字化管理规划,Email:52285045@qq.com

通讯作者:黄际元(1988—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为储能电力系统的应用,Email:hjy_SGCCC@163.com

用越来越广泛。相较于电网改造和负荷改造,加装电压暂降治理装备因其经济性和便捷性成为电压暂降治理手段的更优选择,但目前已有的电压暂降治理装备功能多较为单一^[8]。本文开发了一款多功能储能型电压暂降治理装备并对其进行了仿真和样机实验验证,结果表明该装备在电网电压暂降时能够迅速作出响应,补偿负荷电压,具有损耗低、效率高的优点,能够有效地降低因电压暂降问题造成的经济损失,同时该装备还具备无功补偿、负载侧谐波滤除等其它电能质量治理功能。

1 原理与设计

1.1 电压暂降治理装备组成

图1所示为多功能电压暂降治理装备系统结构图。该系统主要由储能单元、隔离变压器、T型三电平逆变器、双向晶闸管模块、维修开关和旁路开关等部分组成,其中双向晶闸管模块可以在电网电压发生暂降时快速关断,用于保护设备及故障旁路;隔离变压器可以为装置提供地线并实现电气隔离;逆变器由功率单元组成,可以实现能量的双向流动,在电网电压暂降时处于逆变状态,给敏感负荷供电,在电网电压正常时处于整流状态,给备份电源进行浮充;备份电源在系统正常运行时会存储能量,当系统突然发生电压暂降时,可以通过逆变器给敏感负荷供电^[9]。

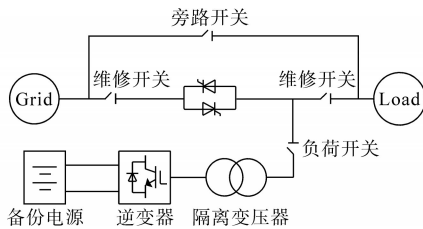


图1 多功能电压暂降治理装备系统结构图
Fig.1 Structure diagram of multifunctional voltage sag treatment equipment system

1.2 T型三电平逆变器工作原理

在本系统中,T型三电平逆变器的作用是将备份电源的直流电转化为交流电提供给负载,是电压暂降治理装备的核心部件^[10]。

单相T型三电平逆变器拓扑如图2所示,该拓扑由两个直流母线电容 C_1 、 C_2 和四组开关器件 $T_1 \sim T_4$ 组成,将两电容中点作为参考点,该单相逆变器拓扑有三种有效的开关组合,可对应输出三类电压: $U_{dc}/2$, 0 , $-U_{dc}/2$, 对应 $T_1 \sim T_4$ 的开关状态及中点电流 i_n 的流向关系如表1所示。为了防止短路,四组开关器件的驱动信号需满足 T_1 和 T_3 , T_2 和 T_4 的

驱动信号均为互补信号,且 T_1 和 T_4 不能同时导通。

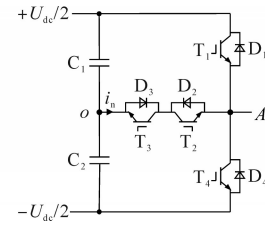


图2 单相T型三电平逆变器拓扑

Fig.2 Single-phase T-type three-level inverter topology

表1 单相T型三电平逆变器开关状态表

Tab.1 Switching state table of single-phase T-type three-level inverter

T_1	T_2	T_3	T_4	U_o	i_n	n
1	1	0	0	$+U_{dc}/2$	0	1
0	1	1	0	0	$\pm i_a$	0
0	0	1	1	$-U_{dc}/2$	0	-1

1.3 三相T型三电平逆变器建模分析

图3所示为三相T型三电平逆变器的等效电路,其中, S_x 表示开关状态, $x=ap, bp, cp, an, bn, cn, ao, bo, co$; L_s, C_f 分别为滤波电感和滤波电容; i_a, i_b, i_c 为滤波电感电流; u_{oa}, u_{ob}, u_{oc} 为输出负载电压; i_{ia}, i_{ib}, i_{ic} 为输出负载电流。根据该等效电路可以得到:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_a}{dt} = -R_s i_a + S_{ap} u_{dc1} - S_{an} u_{dc2} - u_{ca} \\ L_s \frac{di_b}{dt} = -R_s i_b + S_{bp} u_{dc1} - S_{bn} u_{dc2} - u_{cb} \\ L_s \frac{di_c}{dt} = -R_s i_c + S_{cp} u_{dc1} - S_{cn} u_{dc2} - u_{cc} \\ C_f \frac{du_{oa}}{dt} = i_a - i_{oa} \\ C_f \frac{du_{ob}}{dt} = i_b - i_{ob} \\ C_f \frac{du_{oc}}{dt} = i_c - i_{oc} \end{cases} \quad (1)$$

将 $a-b-c$ 坐标系下的式(1)转换到 $d-q$ 坐标系下,可以得到:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + S_{dp} u_{dc1} - S_{dn} u_{dc2} - u_{od} + \omega L i_q \\ L_s \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q + S_{qp} u_{dc1} - S_{qn} u_{dc2} - u_{oq} - \omega L i_d \\ L_s \frac{di_0}{dt} = -R_s i_0 + S_{0p} u_{dc1} - S_{0n} u_{dc2} - u_{o0} \\ C_f \frac{du_{od}}{dt} = i_d - i_{od} + \omega C_f u_{oq} \\ C_f \frac{du_{oq}}{dt} = i_q - i_{oq} - \omega C_f u_{od} \\ C_f \frac{du_{o0}}{dt} = i_0 - i_{o0} \end{cases} \quad (2)$$

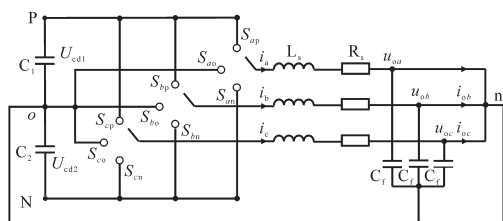


图3 三相T型三电平逆变器系统等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of three-phase T-type three-level inverter system

由式(2)可以看出:在 d - q 旋转坐标系下, d 轴与 q 轴互相耦合, 其中 ωLi_q , $-\omega Li_d$ 为电感电流耦合项, $\omega C_l u_{oq}$, $-\omega C_l u_{od}$ 为电容电压耦合项, 因此需要在控制器的输出中加入与上述耦合项大小相等、方向相反的解耦量, 以实现 d 轴和 q 轴的独立控制。

1.4 三相 T 型三电平逆变器调制算法

三电平逆变器可以采用多种调制方式,其中正弦脉宽调制技术(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)因具有控制简单、实现成本低等优点而被广泛应用^[11-12]。本文中采用了载波同相层叠SPWM调制技术,其原理图如图4所示。图中, u_r 为正弦调制波; u_{c1}, u_{c2} 为完全相同、上下层叠的两个载波。上层载波 u_{c1} 和 u_r 相比较可以得到 T_1 的驱动信号,其互补信号作为 T_3 的驱动信号,同理,下层载波 u_{c2} 和 u_r 比较得到另一组互补信号作为 T_2 和 T_4 的驱动信号。

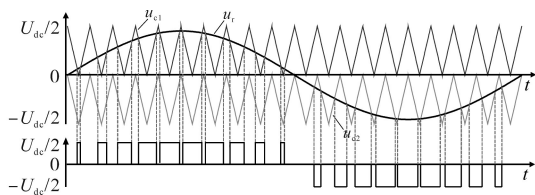


图4 载波同相层叠SPWM

Fig.4 Carrier in-phase disposition SPWM

2 算法开发

2.1 系统控制算法设计

在电网电压正常时,装备处于并网运行模式,采用电压电流双闭环控制,双环均使用比例积分(proportional integral, PI)控制器。系统在并网工况下的控制策略框图如图5所示,图中 U_{dc} 为直流母线电容电压,外环为直流电压控制环,其控制器的输出作为坐标变换后电流内环 d 轴的指令值。为实现 d 轴和 q 轴的解耦控制,将解耦量叠加至电流内环控制器的输出上,再叠加电网前馈电压后得到控制电压,经过坐标变换后送入

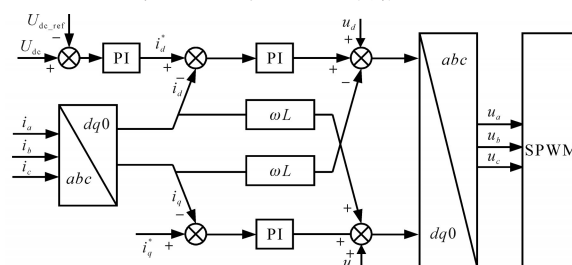


图5 并网工况下的控制策略框图

Fig.5 Control strategy block diagram under grid-connected conditions

当检测到电网电压发生暂降时,通过锁相环锁存电网电压跌落前的电压幅值与相位,待三相双向晶闸管断开后,逆变单元以锁存的电压幅值与相位为基准,平滑切入至离网补偿状态。补偿状态下采用VF控制策略。内外环均使用PI控制器,内环为电感电流调节环,能够实现快速抗扰动,外环为电压控制环,能够跟踪指令电压值,从而改善输出电压波形质量。经过坐标变换后,同样通过前馈解耦加快了系统的响应速度并实现 d, q 轴的独立控制^[4]。系统在补偿工况下的控制策略框图如图6所示。电网电压恢复正常后,恢复三相双向晶闸管的触发信号,装备退出补偿模式,完成并网。

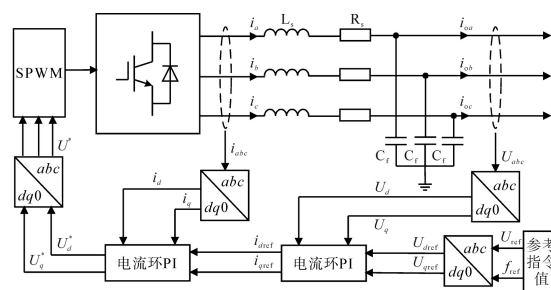


图6 补偿工况下的控制策略框图

Fig.6 Control strategy block diagram under compensation condition

利用装备的四象限运行能力,通过调节逆变单元交流侧输出的电压的幅值和相位可以改变装备输出无功电流的幅值,即可使装置吸收或者发出无功,实现无功补偿功能。

在系统实际运行过程中,由于非线性负载与电气设备的接入,电网电流会存在大量谐波,影响系统的稳定运行,因此需要有效的谐波抑制策略^[15]。传统的PI控制器无法实现对谐波分量的无静差调节,因此本文基于矢量比例积分(vector proportional integral, VPI)控制器,研究了系统在 α - β 坐标系下的谐波电流控制策略,VPI控制器结构如图7所示,其开环传递函数如下式:

$$G_h = \sum_{h=2,3,4,\dots} 2 \frac{k_{ih}s^2 + k_{ch}s}{s^2 + (h\omega_g)^2} \quad (3)$$

式中: k_{ih}, k_{ch} 分别为比例和谐振调节系数; ω_g 为基波电压角频率; h 为谐波选频系数。

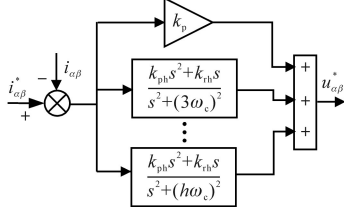


图7 P-VPI控制器结构图

Fig.7 Block diagram of P-VPI controller

该控制器在谐波频率处有极大的开环增益,可以对指定频次的谐波进行无静差跟踪。基于 α - β 坐标系的谐波电流控制策略框图如图8所示,在并网工况控制策略的基础上加入了谐波电流控制环,采用该控制策略能够有效滤除负载侧谐波电流分量。

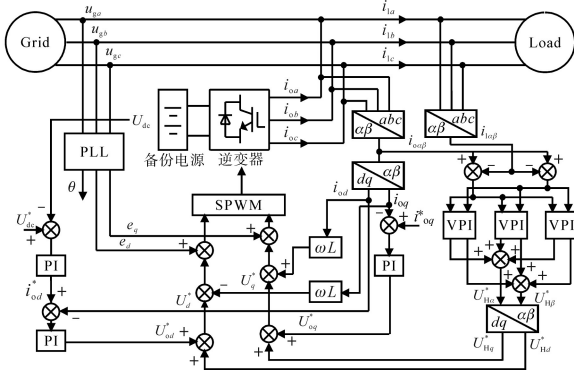


图8 谐波电流控制策略框图

Fig.8 Block diagram of harmonic current control strategy

2.2 电压暂降混合检测算法

基于瞬时无功理论的 dq 变换法自被提出以来逐渐发展完善,成为电压跌落检测最为常见的方法,但由于需要构造三相虚拟电压,会造成较大的检测延时,完成一次电压暂降检测需要长达3 ms的时间,并不能满足实际需求^[16]。在电压暂降检测过程中,实现对电网电压相位的准确跟踪至关重要,而传统的基于 d - q 坐标系的锁相环在电网电压畸变时无法准确测量电网频率。因此本文提出了一种电压暂降混合检测算法,该算法采用求导变换简化了 d, q 轴电压构造方法,有效地减小了算法延时,从而提升了检测的快速性,能够在0.2 ms内完成电压暂降检测,锁相环采用自适应二阶广义积分器锁相环技术(second order generalized integrator phase-locked loop, SOGI-PLL)来精准跟踪电网电压相位信号^[17-18]。

求导变换法检测电压跌落的流程图如图9所示。设被检测电压的表达式为

$$u_1 = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (4)$$

式中: U_1 为被检测电压信号的基波分量幅值; ω 为被检测电压信号的角频率; φ_1 为被检测电压信号的初始相位。

对式(4)求导并除以角频率 ω 得到:

$$u_2 = u_1' / \omega = U_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (5)$$

将 u_1, u_2 分别作为 α - β 坐标系下的 u_α, u_β 分量,构造出一组虚拟的 α 轴和 β 轴电压,再将其变换至 d - q 坐标系下,经过低通滤波滤除交流分量后可得到:

$$\begin{cases} u_{d1} = U_1 \sin \varphi_1 \\ u_{q1} = U_1 \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{d1}, u_{q1} 分别为 d - q 坐标系下的 d, q 轴电压分量。进一步计算可得到被检测电压的幅值和相位为

$$\begin{cases} U_1 = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} \\ \varphi_1 = \arctan(u_{d1}/u_{q1}) \end{cases} \quad (7)$$

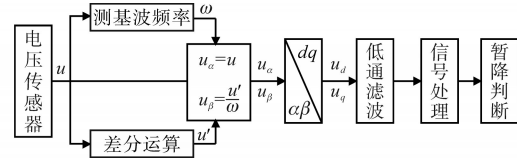


图9 求导变换法原理框图

Fig.9 Schematic diagram of derivative transformation method

自适应SOGI-PLL算法原理图如图10所示。该算法首先通过正交信号发生器构造与输入检测信号相差90°的正交信号,以此消除负序分量的影响,在电网电压波动时仍可以精确提取电网基波正序电压分量,构建的正交信号 V_α 与 V_β 的闭环传递函数为

$$\begin{cases} H_\alpha(s) = \frac{V_\alpha}{V_{inv}}(s) = \frac{k\omega_m s}{s^2 + k\omega_m s + \omega_m^2} \\ H_\beta(s) = \frac{V_\beta}{V_{inv}}(s) = \frac{k\omega_m^2}{s^2 + k\omega_m s + \omega_m^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_{inv} 为输入待检测信号; V_α 为与 V_{inv} 同相的信号; V_β 为 V_{inv} 移相90°后的信号; k 为增益常数; ω_m 为锁相环中心频率。

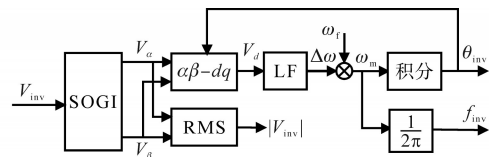


图10 自适应SOGI-PLL算法原理图

Fig.10 Schematic diagram of adaptive SOGI-PLL algorithm

由式(8)可得, $H_\alpha(s)$ 有一个 $s=0$ 的零点,可消除频率为零的直流分量。为了消除频率偏移对检

测的影响,取锁相环中心频率 $\omega_m=\omega_i+\Delta\omega$,即在系统基波频率 ω_i 上叠加经低通滤波后的 $\Delta\omega$,通过反馈实现频率自适应,以实现追踪电网频率的准确性。增益常数 k 越小,滤波效果越好。 k 取1时该传函对应的Bode图如图11所示,图中 $H_\alpha(s)$ 为带通滤波器,其在中心频率 ω_m 处的增益为单位增益。

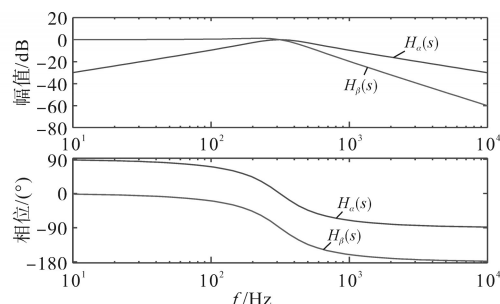


图11 SOGI闭环传递函数Bode图

Fig.11 SOGI closed-loop transfer function Bode diagram

2.3 晶闸管快速切换策略

当电网电压发生暂降时,晶闸管需快速完成关断,然而根据晶闸管及电网频率的特性,在撤掉晶闸管门极触发信号以后,最长需要10 ms的时间来完成自然关断,难以满足敏感负荷设备的要求。根据双向晶闸管的导通情况控制逆变器输出特定的电压值,在导通的晶闸管两端形成反压来实现快速关断。

晶闸管的关断策略流程图如图12所示,首先通过判断电流方向来确定两个晶闸管的导通状况,实际采样中由于采样精度的影响在电流过零点附近可能导致判断不准确,因此在采样精度以下的采样值不作为判据,此时若电流尚未过零,则电流减小到零后晶闸管因失去触发信号将会自然关断,若此时电流已过零,则经过短暂延时后电流幅值增大到采样精度以上,即可进行准

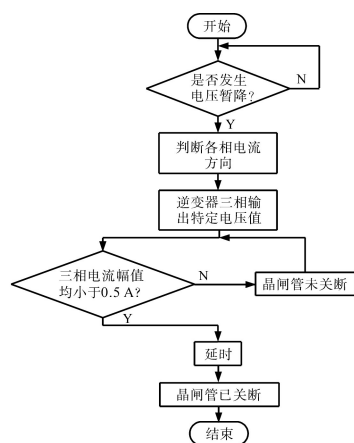


图12 晶闸管关断策略流程图

Fig.12 Flow chart of thyristor turn-off strategy

确判断。在图1中,若规定电流从左到右为正方向,当电流为正时,双向晶闸管中的下管导通,此时控制逆变器输出350 V电压,则下管因承受反压快速关断,上管导通时类似,控制逆变器输出-350 V电压使上管承受反压关断。关断期间当检测到流经晶闸管的电流减小到维持电流时,设置一定延时使晶闸管充分恢复其对正向电压的阻断能力,确保晶闸管已可靠关断。

3 仿真验证

为验证电压暂降治理策略的正确性,在Matlab/Simulink中搭建了电网电压暂降后储能型样机自动切入的仿真模型,仿真参数设置如下:交流电压380 V,中间直流电容1.25 mF,并网滤波电感 $L_1=230 \mu\text{H}$,并网滤波电容 $L_2=15 \mu\text{H}$,阻尼电阻 0.23Ω ,并网滤波电容 $30 \mu\text{F}$,开关频率5 kHz,负载电阻 2.904Ω ,直流母线电压700 V。仿真中模拟电网电压在0.2 s时发生三相电压跌落,在0.4 s时恢复正常。当装备检测到电网电压发生跌落时,逆变器立刻切换至输出状态,系统中的双向晶闸管此时承受反向电压关断,从而切断电网三相电压,转而直接采用储能型样机对负荷供电,在3 ms内负载电压逐渐稳定,仿真结果如图13所示。0.4 s时设置电网电压恢复正常,此时储能型样机逐渐

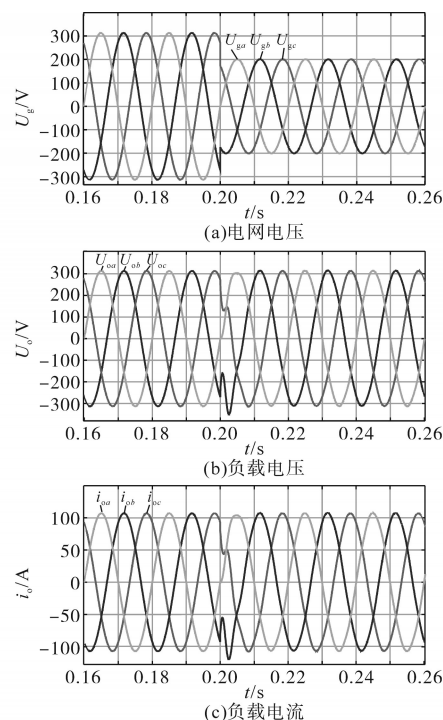


图13 切入工作模式(电网电压暂降时)仿真波形图

Fig.13 Simulation waveform diagrams of switching to the working mode (when the grid voltage sags)

退出补偿模式,且能实现负载电压无缝切换,仿真结果如图14所示。补偿过程中负载电压的总谐波失真只有1.25%,满足电能质量相关要求。

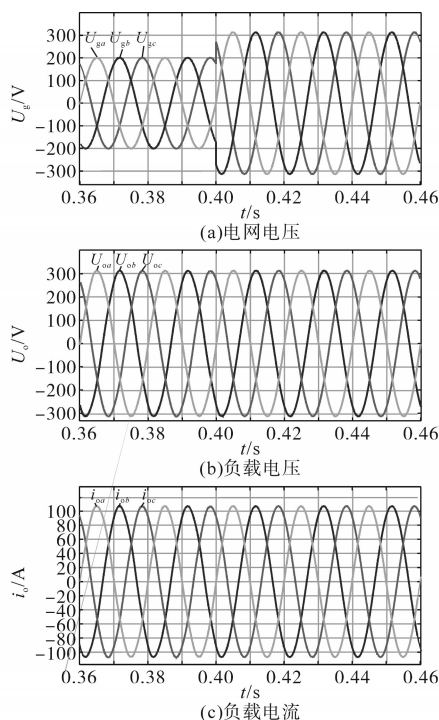


图14 切出工作模式(电网电压恢复时)仿真波形图
Fig.14 Simulation waveform diagrams of cut-out working mode (when the grid voltage is restored)

4 实验

基于上述理论分析及仿真验证,搭建了50 kW电压暂降治理装置样机,并对样机进行了可靠性测试和性能测试。装置在空载条件下,用电电压暂降发生器产生三相电压跌落,跌落深度为50%时,实验测得装置全响应时间为1.4 ms,验证了本文所提出的电压暂降混合检测算法的快速性。装置在带载条件下制造三相跌落,储能型装置激活,电压跌落深度为30%和70%时的实验波形分别如图15、图16所示,装置实现了并网运行模式与离网补偿模式的快速切换,补偿期间装置实际输

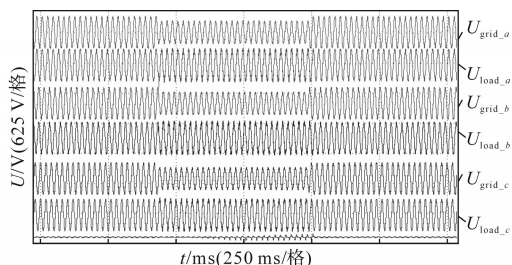


图15 自动补偿实验波形(暂降深度30%)
Fig.15 Waveforms of automatic compensation experiment (sag depth 30%)

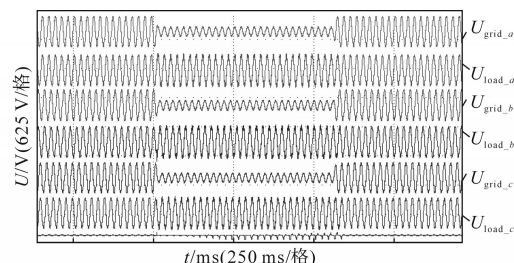


图16 自动补偿实验波形(暂降深度70%)
Fig.16 Waveforms of automatic compensation experiment (sag depth 70%)

出电压的补偿误差小于设定值的2%,且负载侧电压不平衡度符合指标要求,负载设备能够稳定正常运行,实验结果表明该装置在并、离网工况下的控制算法均具有良好的稳态控制效果。

电压恢复同步和延时退出功能的实验波形如图17所示,由图可以看出,装置成功实现了并网模式到孤岛模式的平滑过渡,完成同步后退出时装置也实现了延迟退出,能够有效地减小电压恢复时负载功率对电网的再次冲击。在不同负载条件下随机进行多次补偿功能测试,装置均能正常工作,且装置在退出补偿状态时,与电网电压相差任意角度均能成功并网,纯电阻负载与谐波负载下样机补偿能力实验图分别如图18和图19所示。

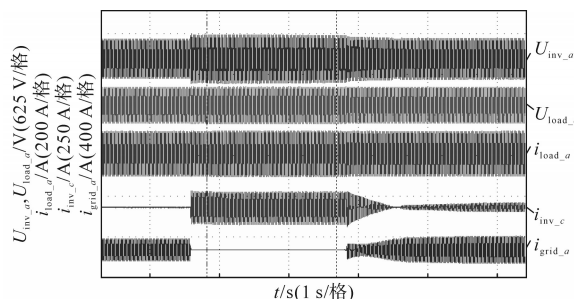


图17 电压恢复同步和延时退出功能测试波形图
Fig.17 Waveform diagrams of voltage recovery synchronization and delay exit function test

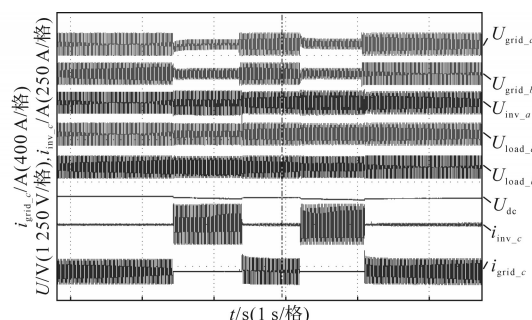


图18 纯电阻负载补偿能力实验图
Fig.18 Waveform diagrams of pure resistance load compensation capability experiment

设备在处于旁路状态时,运用装置的四象限运行能力,通过控制装置输出的无功电流,能够

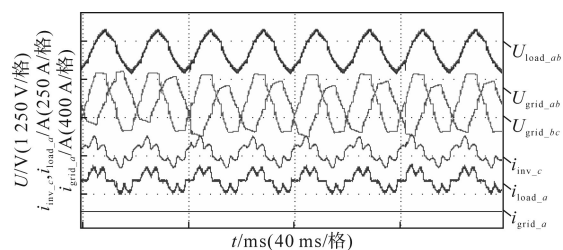


图19 谐波负载补偿能力实验图

Fig.19 Waveform diagrams of harmonic load compensation capability experiment

实现对负载侧功率因数的补偿,感性无功补偿和容性无功补偿测试数据分别如表2和表3所示,在不同设定容量下的补偿误差均小于5%。采用本文提出的在 α - β 坐标系下的谐波电流控制策略,测得负载侧谐波滤除功能测试数据如表4所示,

表2 感性无功补偿功能测试数据表

Tab.2 Test data sheet for inductive reactive power compensation function

设定容量/(kV·A)	输出功率/(kV·A)	偏差/%
20	20.33	1.65
50	50.28	0.50

表3 容性无功补偿功能测试数据表

Tab.3 Test data sheet for capacitive reactive power compensation function

设定容量/(kV·A)	输出功率/(kV·A)	偏差/%
-20	-19.04	-4.80
-35	-34.82	-0.51

表4 负载侧谐波滤除功能测试数据表

Tab.4 Test data sheet for load side harmonic filtering

相序	谐波次数	电网电流 THD/%	谐波源电流 THD/%
A相	5	1.27	15.12
	7	0.27	10.98
	11	1.77	7.59
	13	0.52	6.61
	17	1.19	5.06
	19	0.67	4.13
B相	5	1.36	15.70
	7	0.52	11.24
	11	1.59	7.45
	13	0.7	6.85
	17	1.13	4.84
	19	0.60	4.38
C相	5	1.25	15.23
	7	0.46	15.23
	11	1.54	11.21
	13	0.52	7.29
	17	1.08	6.82
	19	0.54	4.82
N相	3	1.75	5.23

实验结果表明,在该控制策略下,装备能够有效滤除负载侧25次以下的谐波电流分量。

在额定输入电压、额定阻性负载条件下,令装置工作在电子旁路状态,测量装置的损耗为0.87%。在额定电流条件下测得装置电压损失为0.42%,样机的各项实验数据均满足指标要求。

5 结论

本文研制了一款多功能电压暂降治理装备,对该系统进行了建模,研究了装备在并、离网工况下的控制策略、并离网切换策略及电流谐波治理策略;提出了一种电压暂降混合检测算法,该算法能够有效地减小检测延时,并能够实现精确锁相;基于晶闸管与电网电压特性研究了双向晶闸管的快速关断策略,解决了晶闸管自然关断延时过长的的问题。在仿真的基础上搭建了50 kW电压暂降治理装备样机,测试结果表明该装备在不同的负载条件下都能实现工作模式的快速平滑切换,在电网电压暂降期间能够为敏感负荷提供稳定的能量支撑,同时该装备还具备无功补偿与负载侧谐波滤除功能及其他潜在应用价值,能够满足用户侧的需求,具有推广应用价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:132-138.
XIAO Xiangning. Analysis and control of power quality[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2010:132-138.
- [2] 李建林,袁晓冬,郁正纲,等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 陈应敏,张守信,王永红. 变频及电能质量综合装置(VSV)及其应用[J]. 电气传动, 2018, 48(5): 59-62.
CHEN Yingmin, ZHANG Shouxin, WANG Yonghong. Unified equipment of variable frequency drive and static var generator and its application[J]. Electric Drive, 2018, 48(5): 59-62.
- [5] 汪颖,周杨,肖先勇,等. 电压暂降问题研究现状及面临的挑战[J]. 供用电, 2018, 35(2): 2-9.
WANG Ying, ZHOU Yang, XIAO Xianrong, et al. Research status and challenges of voltage sag issue[J]. Distribution & Utili-

- zation, 2018, 35(2): 2-9.
- [6] 孙建军. 现代配电网电压暂降问题及其运行韧性提升[J]. 电气应用, 2019, 38(3): 4-7.
- SUN Jianjun. The problem of voltage sag in modern distribution network and its operation resilience improvement[J]. Electro-technical Application, 2019, 38(3): 4-7.
- [7] 胡安平, 陶以彬, 陈嘉源, 等. 电压暂降治理措施及设备综述[J]. 电力电子技术, 2019, 53(7): 1-5, 10.
- HU Anping, TAO Yibin, CHEN Jiayuan, et al. Review of voltage sag mitigation measures and equipments[J]. Power Electronics, 2019, 53(7): 1-5, 10.
- [8] 胡卫丰, 周宇, 周洪益, 等. 考虑分布式光伏并网的电能质量治理方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5): 245-250.
- HU Weifeng, ZHOU Yu, ZHOU Hongyi, et al. Research on power quality control method considering distributed photovoltaic grid connection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(5): 245-250.
- [9] 徐灵渊, 陈德彪, 赵晋斌. 基于最小功率补偿的动态电压补偿器设计[J]. 供用电, 2020, 37(3): 45-51.
- XU Jiongyuan, CHEN Debiao, ZHAO Jinbin. Design of dynamic voltage restorer based on minimum power compensation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 45-51.
- [10] 孙广宇, 李永丽, 靳伟, 等. 基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1211-1221.
- SUN Guangyu, LI Yongli, JIN Wei, et al. A comprehensive power quality control strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverters[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1211-1221.
- [11] MOHSIN M H, ALSHAMAA N K, HAMMOOD Dalal A, et al. Sinusoidal inverter using pulse width amplitude modulation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 745: 012022.
- [12] 徐栋, 王英. 大功率两电平电压源逆变器脉宽调制策略的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(8): 64-69.
- XU Dong, WANG Ying. Research on pulse width modulation strategy of high power two-level voltage source inverter[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(8): 64-69.
- [13] 龚秋英, 马鑫金, 李艳. 一种级联型多电平并网逆变器控制策略的研究[J]. 电气传动, 2020, 50(11): 13-16.
- GONG Qiuying, MA Xinjin, LI Yan. Research on control strategy of a cascade multi-level grid-connected inverter[J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 13-16.
- [14] 朱作滨, 黄绍平, 李振兴, 等. 微电网储能变流器离网/并网切换控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2019, 14(2): 92-96.
- ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing, et al. Research on off grid/grid switching control strategy of micro-grid power converter system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(2): 92-96.
- [15] 吴嘉琪, 罗念华, 朱劲磊, 等. 用于VSC-HVDC系统谐波抑制的PI与VPI并联控制[J/OL]. 电源学报: (2022-05-11) [2022-06-21] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20220509.0857.002.html>.
- WU Jiaqi, LUO Nianhua, ZHU Jinlei, et al. PI parallel VPI scheme for harmonic suppression of VSC-HVDC system [J/OL]. Journal of Power Supply: (2022-05-11) [2022-06-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20220509.0857.002.html>.
- [16] 姜华, 白金花, 沈兴来, 等. 适应配电网动态电压恢复控制的跌落量检测方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(4): 89-92.
- JIANG Hua, BAI Jinhua, SHEN Xinglai, et al. Research on drop detection method adapted to dynamic voltage recovery control of distribution network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(4): 89-92.
- [17] 陈鹏飞, 徐耀良, 王悦, 等. 基于双层控制和多SOGI的三相数字锁相环设计[J]. 电气传动, 2017, 47(5): 58-62.
- CHEN Pengfei, XU Yaoliang, WANG Yue, et al. Design of three-phase digital phase-locked loop based on double-layer control and multi-SOGI[J]. Electric Drive, 2017, 47(5): 58-62.
- [18] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型DSOGI-PLL的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- TU Juan, TANG Ningping. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356.

收稿日期: 2022-06-21

修改稿日期: 2022-07-28