面向数据中心的高品质供电研究

刘 树1,张高言2,石 山1,屠黎明1,王元超2,萧 珺2,毛承雄2

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司,北京 100085:

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:数据中心现有供电方案一般需经过 AC/DC 和 DC/AC 2 次变换,同时不间断电源一般需通过逆变器为 负载供电,其供电可靠性和供电质量有待进一步提高,为此提出一种面向数据中心的高品质供电方案。首先给 出方案的拓扑结构,在此基础上分析了方案的工作原理及数学模型,并提出一种基于电压补偿、双电源功率均 衡和紧急供电的协调控制策略,在 MATLAB/Simulink 中对面向数据中心高品质供电方案进行了仿真验证。研 究结果表明,所提方案能够很好地补偿电网电压的暂升、暂降和谐波干扰等,实现双电源功率协调分配,保障双 电源停电时的不间断供电。

关键词:数据中心;高品质供电;协调控制策略;电压补偿;功率协调分配;不间断供电 中图分类号:TN 86;TM 46 __________ 文献标识码: A _________ DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.020

0 引言

近年来,我国数据中心已经成为一种产业,数据 中心作为连续运行的重要场合,对供电可靠性、供电 质量的要求非常高,研究数据中心的高品质供电具 有重要意义。现有的数据中心供电方案,一般至少配 置了2路交流输入电源——主供电电网和完全独立 的备用电网或柴油发电机;中间环节配备冗余的不间 断电源(UPS),UPS一般由整流器、逆变器、储能电池 等组成,将市电经整流器、逆变器变换后输给数据中 心负载。正常情况下,市电经整流器变换为直流电供 给逆变器,同时给蓄电池充电,逆变器将直流电变换 为交流电供给负载;故障情况下,UPS 提供短时断电 的后备保证,备用电源则保证市电长时间断电的电 力供应^[1]。

现有方案通过设置备用电源,采用并联冗余 UPS, 一定程度上保证了数据中心的可靠供电。但是现有 数据中心供电方案能源变换过程多,系统存在着 UPS 和负载 2 个谐波源;同时 UPS 中的备用能源(电池) 要经过逆变器才能向负载供电,现有的供电方案在供 电可靠性和供电质量方面还有待进一步提高^[2-5]。目 前研究供电可靠性和供电质量的文献比较多,文献 [6]分析了短时停电发生的原因、特性及其对用户造 成的影响,指出短时停电已成为影响供电质量的主 要原因。文献[7]给出一种新型分散式电能质量调节 器,串联补偿单元可补偿其所在支路敏感负荷端电压, 改善了供电质量,实现了高品质供电。文献[8]提出

收稿日期:2016-04-27;修回日期:2017-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277083);国家重点基 础研究发展计划(973 计划)资助项目(2015CB251302) 了一种双电源备用供电型通用潮流控制器,4个变换器共用一条直流母线,能够实现有功功率的相互补偿,且可实现不间断供电,有效提高了电力系统的供电可靠性。文献[9]指出数据中心的能源效率不到50%,因为超过一半的功率消耗在转换、分配等过程中,提出采用直流供电,减少配电损耗,消除不必要的功率转换阶段。文献[10]介绍了一种直流 UPS,因为采取直流供电,提高了能源效率,同时储能系统不再通过逆变器接入系统,可直接接入直流侧,提高了供电可靠性。文献[11]提出一种基于直流母线互联的电网功率可控型太阳能电池、电网以及蓄电池混合供电的不间断逆变电源,采用共用直流母线实现能量耦合,无需复杂的同步均流并联技术,提高了系统运行效率和供电可靠性。

本文结合数据中心的供电特点,提出一种应用 于数据中心的高品质供电方案,所提方案采用双电 源同时供电,结合直流供电的优势,能够保证系统的 长期运行,通过在直流侧设置储能电池,使其具有直 流 UPS 功能;同时提出一种应用于所提方案的协调 控制策略,所提的控制策略可补偿电源不平衡电压 和谐波电压等,确保一路电源故障时负载的无缝转 移和实现双电源功率协调分配,所提方案保证了数据 中心的高品质供电。本文首先给出数据中心高品质 供电方案的结构,然后分析方案的功能、工作原理、 数学模型,最后建立仿真模型,仿真结果验证了所提 方案和控制策略的有效性。

1 拓扑结构及工作原理

数据中心高品质供电方案由多种新型的具有综合电能质量调节能力的电力电子装置组成,其拓扑结构如图1所示。方案由以下各部分组成:双电源,即2个来自不同变电站的交流电源 S₁,S₂;串联变压

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277083) and the National Basic Research Program of China (973 Program) (2015 CB251302)

器 T_s,原边串接在电源和三相变换器之间,副边与单 相变换器交流侧相连;三单相变换器,由 3 个单相变 换器组成,直流侧汇于直流母线;主变换器,由三相 全控半桥电路组成,实现 AC/DC 变换;直流母线,作 为 2 个并联主变换器的公共输出端,给直流负载供电; 柴油发电机+储能装置,构成应急电源系统,保证负 载的不间断供电;DC/DC 变换器,实现不同电压等级 的直流负载供电。



图 1 数据中心高品质供电方案结构图

Fig.1 Structural diagram of high-quality power-supply for data center

本文所提出的方案具有以下功能。

a. 在电网电压畸变、不对称等情况下,主变换器 交流侧电压始终保持对称且为额定正弦波。

b. 在一路电源发生短路故障时,可保证故障支路承受负载无缝转移到正常供电支路。

c. 控制双电源输入电流相等,同时实现主变换器 交流侧单位功率因数输入。

d. 在负载突变情况下,系统自动分配负载,能够 正常为直流负载供电,具有较好的负荷扩展性。

e. 双电源都掉电时,通过控制直流侧储能装置, 可实现负载的不间断供电,具有 UPS 的功能;当电 网恢复供电后,系统能重新回到双电源供电状态。

图 2 给出了方案采用双电源输入的原理图,电路 中忽略了线路阻抗,串联变压器 T_s 视为理想变压器。 图中, P_{s1}、Q_{s1} 和 P_{s2}、Q_{s2}分别为电源 1 和电源 2 输出的 有功功率、无功功率; P₁、Q₁ 和 P₂、Q₂分别为电源 1 和 电源 2 所在支路的三单相变换器补偿电压过程中消耗的有功功率、无功功率; P_{T1}、P_{T2}分别为电源 1 和电源 2 所在支路经补偿后提供的有功功率; du1、du2 分别为电源 1 和电源 2 所在支路的三单相变换器提供的补偿电压; U_{DC} 为直流母线电压; P_{LDC} 为直流负载消耗的有功功率。



Fig.2 Schematic diagram of high-quality power-supply for data center

当双电源输入电压 u_{s1}、u_{s2} 出现暂升、暂降和谐 波 u_{s11}、u_{s12} 时,控制三单相变换器,使得三单相变换 器提供的补偿电压 du=du_s+du_h=(u_s-u_r)+u_{s1},既抵 消电源电压 u_s中的谐波 u_{sh},又补偿基波电压与参考 电压的偏差,可使输出至主变换器的电压 u_{r1}、u_{r2} 成 为与电源基波电压 u_s同相且不变的额定正弦波。通 过控制主变换器为额定基波正弦电流源,使其交流 侧输入电流 i_{s1}、i_{s2} 为与主变换器交流侧输入电压 u_{r1}、 u_{r2}同相的正弦波,实现主变换器交流侧单位功率因 数输入;同时通过控制双电源输出电流幅值相等,实 现双电源输出功率的协调平衡。当双电源同时停电 时,控制储能系统中的 DC/DC 变换器,快速投入储 能电池,保证直流侧负载的不间断供电。

2 数学模型

所提方案的数学模型包括三单相变换器、主变换器的数学模型,储能系统的数学模型参考文献[12]给出的数学模型,本文不再详述。为方便建模,作以下假设:电路中各开关器件为理想的开关器件;三相输入电感对称,即其电感值及等效内阻大小相等;滤波电容主要用于消除开关纹波,在建模时可以忽略不计。

2.1 三单相变换器的数学模型

图 1 中的三单相变换器由 3 个单相 H 桥变换器组成,优点是三相的控制完全独立,控制系统相对简单,同时能够补偿不平衡电压。图 3 给出了三单相变换器的结构图,由输入滤波电感 L_s、输入滤波电感 电阻 r、滤波电容 C_s、H 桥电路等部分组成^[13]。

为简化分析,给出三单相变换器 a 相模型,如图



图 3 三单相变换器结构图 Fig.3 Structural diagram of triple single-phase converter

4 所示。图 4 中, u_{es} 、 i_e 分别为滤波电容上的电压和电流; L_s 、 i_d 、 i_s 分别为 a 相变换器输入电感、电感电流和 串联变压器副边电流; u_{Da} 、 u_{da} 、 u_{ra} 、 u_{sa} 分别为 a 相变换 器交流侧电压、串联变压器副边电压、理想参考电压 和电源的 a 相电压。



图 4 三单相变换器重 a 相电路图 Fig.4 Phase-a circuitry of triple single-phase converter

根据图 4 所示单相拓扑图可得三单相变换器 a 相的输入交流侧数学模型,如式(1)—(3)所示,式中 考虑了电感的等效内阻,串联变压器变比设为 1,另 外两相的数学模型类似。

$$u_{\rm cs} = u_{\rm Da} - r \dot{i}_{\rm da} - L_{\rm s} \frac{\mathrm{d} \, u_{\rm da}}{\mathrm{d} \, t} \tag{1}$$

$$i_{\rm da} = i_{\rm c} + i_{\rm s} \tag{2}$$

$$u_{\rm cs} = u_{\rm da} = u_{\rm ra} - u_{\rm sa} \tag{3}$$

2.2 主变换器数学模型

图 5 给出了主变换器的结构图,由输入电感 L、 滤波电容 C、三相半桥电路、直流侧电容 C_{de}等组成, 其中 P 和 N 分别为直流侧正、负母线,显然主变换 器为电压源型 PWM 换流器^[13-15]。





侧的数学模型如下:

$$\begin{cases} u_{1a} = L \frac{di_{1a}}{dt} + Ri_{1a} + u_{a} + U_{NO} \\ u_{1b} = L \frac{di_{1b}}{dt} + Ri_{1b} + u_{b} + U_{NO} \\ u_{1c} = L \frac{di_{1c}}{dt} + Ri_{1c} + u_{c} + U_{NO} \end{cases}$$
(4)

其中, u_{1a} 、 u_{1b} 、 u_{1c} 为滤波电容的电压; u_{a} 、 u_{b} 、 u_{c} 为主变 换器交流侧三相电压; i_{1a} 、 i_{1b} 、 i_{1c} 为主变换器交流侧输 入电流;L、R分别为滤波电感和电感电阻; U_{NO} 为直 流负母线与电源中性点间电压。

根据 Park 变换,可得到基于 dq 同步旋转坐标系的主变换器数学模型如下:

$$L\frac{\mathrm{d}i_{1d}}{\mathrm{d}t} = \omega Li_{1q} - Ri_{1d} + u_{1d} - u_d$$

$$L\frac{\mathrm{d}i_{1q}}{\mathrm{d}t} = -\omega Li_{1d} - Ri_{1q} + u_{1q} - u_q$$
(5)

其中, ω 为系统角频率; i_{1d} 、 i_{1q} 分别为主变换器交流侧 输入电流的 d 轴和 q 轴分量; u_d 、 u_q 分别为主变换器 交流侧电压的 d 轴和 q 轴分量; u_{1d} 、 u_{1q} 分别为滤波 电容电压的 d 轴和 q 轴分量。

3 方案协调控制策略

为实现直流母线电压稳定,保证双电源输入功率 的均衡,同时实现双电源停电时的紧急供电,需引入 协调控制策略:三单相变换器采用电压指令前馈和 双闭环结合的复合控制;主变换器采用对等控制;储 能系统采用恒压放电模式下的电压电流双环控制。

3.1 三单相变换器的控制

直流供电中,交流侧电压发生暂升、暂降和闪变 时,直流母线电压幅值会出现波动;交流侧电压不平 衡输入时,直流母线电压会出现2次谐波;交流侧电 压出现相位跳变和含有谐波时,直流母线电压也会 出现谐波干扰^[16],严重影响负载的供电质量,需要利 用三单相变换器改善输入交流侧电压的波形,进而 稳定直流母线电压。电压外环与电流内环的双闭环 控制作为一种成熟的控制策略,其动态响应速度十 分快,并且静态误差很小,将其引入三单相变换器中, 可快速准确补偿交流侧电压的暂升、暂降、谐波干扰 和不平衡输入等,保障数据中心直流负载的高品质 供电。但是当供电系统交流侧电压发生深度跌落(如 短路故障)时,因为采用双闭环控制的三单相变换系 统的输出电压需要跟随参考电压信号变化,此时闭 环控制的跟随任务会比较重,而系统的调节速度有 限,很可能导致输出电压与指令电压存在偏差,波形 出现畸变。为改进此缺点,本文结合开环控制动态响 应快的优点,在双闭环反馈控制中引入参考电压前 馈控制组成复合控制策略,控制性能得到明显提高,

根据三单相变换器的数学模型,复合控制策略框图 如图 6 所示。



图 6 三单相变换器 a 相控制系统框图 Fig.6 Block diagram of phase-a control system for triple single-phase converter

为了简化控制系统和便于调节电流,电流内环采用 P 控制器,以增加 H 桥的阻尼系数和系统的稳定性;为了减小输出电压的稳态误差,电压外环采用 PI 控制器,使电压波形瞬时跟踪给定值。

通过三单相变换器的控制,主变换器交流侧电压 成为三相对称的额定正弦波,提高了直流母线运行的 稳定性,保证了直流侧负载的可靠、高质供电;同时 也减轻了谐波电压对主变换器的干扰,为主变换器的 控制打下基础。

3.2 主变换器的控制

本文采用的双电源输入系统互为热备用,2路 电源正常供电时,如果输入功率不对称,某一路长期 承受较重的功率,另一路承受较轻的功率,必然会加 大承受重功率的主变换器的损坏概率,降低了系统 的可靠性和运行效率;同时当任一路电源出现故障 时,另一路必须完全承受直流侧负载。综合以上考虑, 本文设置2路并联输入的容量对称。

为提高系统供电可靠性、经济性和运行效率,需 要控制图1中的并联主变换器,使双电源以单位功 率因数输入,保证正常供电时双电源输出功率的均 衡,同时实现直流侧负载在一路电源故障时能够无 缝转移到正常供电的线路。由于并联主变换器不存 在主从关系,本文采用对等控制模式对并联主变换 器进行控制^[17-18],在对等控制模式下,系统中每个主 变换器都参与直流母线电压的调节;在负荷变化时, 能够自动分担负荷的变化量,使系统达到一个新的 稳态工作点,最终实现输出功率的协调分配。

为实现单位功率因数输入,控制图 1 中的主变换 器为基波正弦电流源,使电网电流成为与交流电压同 相的基波正弦电流,电路中将不存在谐波电流和无功 电流,其控制框图如图 7 所示。图 7 中指令电流 *I*^{*}₄ 反映了负载所需有功功率的大小,忽略电池充电功率 和系统中电感、电容、开关器件的功率损耗,在单位 功率因数输入下,由系统功率平衡可知:

$$P_{\rm dc} = 3 U_{\rm r1} I_{\rm s1} + 3 U_{\rm r2} I_{\rm s2} \tag{6}$$

其中, P_{dc}为直流母线功率; U_{r1}、U_{r2}为并联主变换器交流侧三相电压的有效值; I_{s1}、I_{s2}为并联主变换器交流 侧三相电流的有效值。

为实现并联支路功率的均衡,双电源输出电流有效值需相等,也即 *I*_{s1}=*I*_{s2}=*I*_s,式(6)可改写为:



图 7 主变换器 1 在 dq0 坐标系下的控制框图 Fig.7 Block diagram of control system in dq0 coordinates for main converter 1

 P_{dc}=3U_{r1}I_{s1}+3U_{r2}I_{s2}=(3U_{r1}+3U_{r2})I_s
 (7)

 采用 Park 变换中的等功率变换时,可计算得到 d

 轴指令电流数值为:

$$I_{\rm 1d}^* = \sqrt{3} I_{\rm s} = \frac{P_{\rm dc}}{\sqrt{u_{\rm 1d}^2 + u_{\rm 1g}^2 + u_{\rm 10}^2} + \sqrt{u_{\rm 2d}^2 + u_{\rm 2g}^2 + u_{\rm 20}^2}} \tag{8}$$

其中,*u*₁₀为主变换器 1 滤波电容电压的 0 轴分量; *u*_{2d},*u*_{2q},*u*₂₀分别为主变换器 2 滤波电容电压的 *d* 轴、 *q* 轴和 0 轴分量。

式(8)得到的指令电流分别送给并联主变换器, 通过并联主变换器的对等控制,实现双路电源输入 电流幅值相等,进而实现功率协调均衡。同时采用式 (8)计算得到的指令电流,还可实现直流侧负载在一 路电源故障时无缝转移到正常供电的线路:当某路 电源出现接地故障,检测到的故障线路电压的 d、q、 0 轴分量为 0,控制关断故障线路的主变换器,此时 式(8)的分母只含有正常回路电源的幅值,计算得到 的正常线路指令电流信号将反映直流侧所有负载功 率,实现负载功率的无缝转移。

3.3 储能系统的控制

图 1 所示的直流侧储能装置能够保证双电源掉 电时的紧急供电,实现负载的不间断供电;当电网恢 复供电后,系统能重新回到双电源供电状态。本文 选用铅酸蓄电池和双向半桥变换器组成电池储能系 统,如图 8 所示^[19]。



图 8 电池储能系统结构 Fig.8 Structure of BESS

考虑到放电状态下储能电池的目标是使直流母 线电压恢复至额定值,维持整个电网内功率平衡,因 此储能电池放电采用电压电流双环控制的恒压放电 模式,如图9所示。图中,U^{*}_b,U_b分别为直流母线电 压参考值和实际值;*I*^{*}_{bat}、*i*_{bat}分别为储能电池放电电 流参考值和实际值。



图 9 电池储能系统控制框图 Fig.9 Block diagram of BESS control

4 算例仿真

为验证数据中心高品质方案以及三单相变换器 和主变换器协调控制策略的有效性,根据图 2 所示 的原理图,基于 MATLAB/Simulink 建立了数据中心 高品质供电方案仿真模型,在 4 种算例下对方案进行 仿真研究,仿真参数如下:双电源输入电压为 380 V/ 50 Hz;直流负载容量为 210 kV·A;直流母线电容为 150 mF;直流母线额定电压为 800 V;串联变压器额 定容量为 100 kV·A,变比 N_1 : N_2 =1:1;三单相变换器 输入电感、电阻、电容分别为 1 mH、0.1 m Ω 、30 μ F; 主变换器输入电感、电阻、电容分别为 1 mH、0.1 m Ω 、 30 μ F;三单相变换器开关频率为 9 kHz;主变换器开 关频率为 9 kHz;储能电池额定电压为 400 V;储能电 池放电电流为 525 A;储能电池 Boost 电感为 100 μ H; 最大仿真步长为 10⁻⁶。

算例 1:电源 2 输入电压 a 相升高 30%、b 相不 变、c 相跌落 30%,三相输入电压相位滞后 30°;同时 输入电压含有 5%的 5、7次谐波;直流负载 3 Ω。仿 真波形如图 10 所示。

由图 10(a)可见,发生升高、跌落和相位跳变,同时包含 5 次和 7 次谐波的电源 2 的电压得到补偿。 由图 10(b)可见,对于传统的直流供电方案,主变换 器承受功率是本文所提方案的 2 倍,降低了系统供电





图 10 电源 2 电压不平衡时仿真结果

Fig.10 Simulative results for unbalanced voltage of power source 2

可靠性,且当输入交流电源出现相位跳变,传统方案 中将存在无功功率,降低了系统经济性和工作效率; 相较于传统方案,本文所提方案实现了并联主变换器 交流侧输入有功功率的均衡,输入无功为0,功率因 数为1,验证了本文所提方案及功率协调控制策略的 有效性。由图10(c)可见,当输入交流电源不平衡及 存在谐波时,传统方案中的直流电压出现倍频分量和 谐波干扰;而本文所提方案能够使直流电压在整个仿 真过程中保持稳定,持续稳定地为负载提供功率。

算例 2:电源 2 出口处发生三相接地短路(短路 时间为 0.45~0.5 s);直流负载 3 Ω。仿真波形如图 11 所示。



图 11 电源 2 山口 亚二 相应增加 具结未 Fig.11 Simulative results for three-phase short circuit at outlet of power source 2

图 11(a)给出了双电源输出电压波形.电源 2 的 电压在 0.45~0.5 s 时为 0。由图 11(b)可见,传统的 直流供电方案在电源发生短路时有功下降为0.故 障切除电源恢复供电时有功和无功会出现很大的波 动,电源投入过程中不能做到无缝投入,不利于系统 稳定:而采用本文所提方案和控制方法,当电源2发 生短路时,支路2有功降为0,支路1有功变为原来 的2倍,负载全部转移给正常供电支路,故障切除 后,负载功率重新进行了协调分配,同时只在故障时 存在无功功率,故障前和故障后并联主变换器交流 侧输入功率因数保持为1.实现了在故障发生和清除 期间的无缝切换,功率波动很小。由图 11(c)可见, 传统的直流供电方案在电源短路时直流电压波动很 大,故障清除后直流电压恢复时间较长;而采用本文 所提方案和控制方法,直流电压在发生短路时的波 动很小,并且能够很快保持稳定,对负载影响小。

算例 3:直流负载在 0.45 s 时由 3 Ω 突变为 1.5 Ω, 在 0.55 s 时恢复为 3 Ω。仿真波形如图 12 所示。



Fig.12 Simulative results for DC-side load sudden-change

由图 12(a)可见,负载突变时,电源 1 与电源 2 的电压能够始终保持不变;由图 12(b)可见,传统的

直流供电方案和本文所提方案在负载突变时,电源 输出有功功率能够快速跟随负载变化,但是传统方 案要求主变换器有更大的容量,不利于负荷的拓展, 且传统方案在负荷突变时无功波动更大,而本文所 提方案只在负荷突变时存在无功功率,负荷稳定后, 并联主变换器交流侧输入功率因数保持为1,证明 了本文所提方案和功率协调控制策略在负载突变时 的有效性;由图12(c)可见,传统方案在负荷突变时, 直流电压波动更大,而本文所提方案在负载突变时, 直流电压有微小的波动,然后保持稳定,对负载的影 响更小。

算例4:双电源在0.4s时同时断电,此时启动直 流侧储能电池,保证负载的不间断供电;直流负载 3Ω。仿真波形如图13所示。



图 13 双电源断电时储能供电仿真结果 Fig.13 Simulative results for BESS during outage of both power sources

由图 13(a)可见,0.4 s 时系统改由储能电池供 电,直流母线电压有轻微的跌落,然后逐渐恢复稳 定;由图 13(b)可见,储能电池在放电过程中,其放 电电流能始终稳定为设定值。

5 结论

针对目前数据中心供电特点和要求,本文提出 一种数据中心高品质供电方案。分析了所提方案的 结构、工作原理和数学模型,通过4种算例仿真验证 了所提方案的有效性。

a. 在数据中心高品质方案的结构、工作原理和 功能的基础上,对三单相变换器、主变换器进行了建 模并制定了协调控制策略。

b. 通过 4 种算例仿真验证了所提方案的有效 性。仿真结果表明,所提方案能够很好地补偿电网电 压的暂升、暂降和不平衡等,保证直流母线电压的稳 定;确保一路电源短路故障时负载的无缝转移;通过 控制主变换器交流侧输入为单位功率因数,进而保 证双电源的均衡出力,实现功率协调分配;在双电源 断电时,直流侧储能装置可实现负载的不间断供电。

参考文献:

- [1] 张广明,韩林.数据中心 UPS 供电系统的设计与应用[M].北京:
 人民邮电出版社,2008:5-117.
- [2] 程哲昕,陆振华,叶海东.数据中心 UPS 供电系统研究[J].建筑 电气,2014(5):57-62.
 CHENG Zhexin,LU Zhenhua,YE Haidong. Research on UPS

systems of data center[J]. Building Electricity,2014(5):57-62.

[3] 宫俊峰.通信交流设备不间断供电的比较[J].通信电源技术, 2012,29(5):78-80.

GONG Junfeng. The comparison of uninterrupted power supply for communication equipment [J]. Communication Power Supply Technology, 2012, 29(5):78-80.

[4] 王力坚. 谐波干扰问题及解决方法和直流 UPS 供电的推广应用
 [J]. 智能建筑与城市信息,2010,163(6):31-34.
 WANG Lijian. The problem and solving method of harmonic in-

terference and the promotion of the DC UPS power supply [J]. Intelligent Building and City Information, 2010, 163(6):31-34.

[5]黄威. 大型数据中心谐波治理方案的研究[D]. 上海:上海交通 大学,2011.

HUANG Wei. The research of harmonic filtration of large data center[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2011.

[6] 李天友,赵会茹,欧大昌,等. 短时停电及其经济损失的估算[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):59-62.

LI Tianyou,ZHAO Huiru,OU Dachang,et al. Short interruption and its cost appraisal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(20):59-62.

[7] 贾东强,韦统振,霍群海.新型分散式电能质量调节器运行研究[J].电工技术学报,2013,28(2):256-261.

JIA Dongqiang, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. Research on operation of new scattered power quality conditioner[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2):256-261.

[8] 刘海波,毛承雄,陆继明,等.双电源备用供电型通用潮流控制器
 [J].高电压技术,2007,33(5):94-98.

LIU Haibo, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Dual-powersupply backup supply type generalized power flow controller[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5):94-98.

- [9] CUI Yutian, XU Fan, ZHANG Weimin, et al. High efficiency data center power supply using wide band gap power devices [C]//2014 Twenty-Ninth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth, TX, USA; IEEE, 2014:3437-3442.
- [10] 刘文军,唐西胜,周龙,等. 基于飞轮储能系统的直流 UPS 控制 方法研究[J]. 电工电能新技术,2014,33(10):16-22.
 LIU Wenjun,TANG Xisheng,ZHOU Long, et al. Research on control method of FESS based DC UPS[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2014,33(10):16-22.
- [11] 吴凤江,孙秀冬,孙力,等. 电网功率可控型太阳能电池-电网-蓄
 电池混合供电不间断逆变电源[J]. 电力自动化设备,2011,31
 (6):11-15.

WU Fengjiang, SUN Xiudong, SUN Li, et al. Grid-power-controllable UPS powered by photovoltaic cell, grid and battery [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6):11-15.

[12] 周稳,戴瑜兴,毕大强,等.交直流混合微电网协同控制策略[J].
 电力自动化设备,2015,35(10):51-57.

ZHOU Wen, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):51-57.

[13] 黄力. 基于三单相 H 桥的动态电压调节器的研究[D]. 武汉:华 中科技大学,2011.

HUANG Li. Research on dynamic voltage restorer based on three single-phase H bridge[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2011.

- [14] 马宏伟,李永东,郑泽东,等. 一种 PWM 整流器的模型预测控制方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):21-25.
 MA Hongwei,LI Yongdong,ZHENG Zedong, et al. Model predictive control of PWM rectifier[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(11):21-25.
- [15] 李娟,严字昕,聂鹏,等. 电压注入型 DCIPC 中 VSC 的控制方式 及运行特性仿真研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(11):37-42.
 LI Juan,YAN Yuxin,NIE Peng,et al. Modeling and simulation of VSC in DCIPC with voltage injection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2015,34(11):37-42.
- [16] 朱韬析,武诚,王超. 交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):93-98.
 ZHU Taoxi,WU Cheng,WANG Chao. Influence of AC system fault on HVDC system and improvement suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(1):93-98.
- [17] 马艺玮,杨苹,吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):103-109.
 MA Yiwei,YANG Ping,WU Jie. Hybrid control strategy of islanded microgrid with numerous distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(11):103-109.
- [18] PAN C T,LIAO Y H. Modeling and coordinate control of circulating currents in parallel three-phase Boost rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(7):825-838.
- [19] 赵祖熠,解大,楚皓翔,等. 基于储能系统的双馈风电机组机网 扭振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):33-39.
 ZHAO Zuyi,XIE Da,CHU Haoxiang,et al. Generator-grid torsional vibration suppression for DFIG system with ESS[J].
 Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):33-39.

作者简介:



刘 树(1981—),男,天津人,高级工程 师,硕士,主要研究方向为电力电子设备开 发(**E-mail**:liushu@sf-auto.com);

张高言(1989—),男,河南开封人,硕士 研究生,通信作者,主要研究方向为大型工 业企业智能电网、大功率电力电子技术在电 力系统中的应用(E-mail:zgyan1990@163. com);

石 山(1980—),男,湖南靖州人,高级工程师,硕士,主 要研究方向为电能质量治理和电力电子设备开发(E-mail: shishan@sf-auto.com);

屠黎明(1972—),男,浙江黄岩人,教授级高级工程师,博士研究生,主要研究方向为工业自动化(E-mail:tulm@sf-auto.com);

王元超(1989—),男,云南宣威人,硕士研究生,主要研 究方向为大型工业企业智能电网、大功率电力电子技术在电 力系统中的应用(E-mail:ycwang@hust.edu.cn);

(下转第146页 continued on page 146)

in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):647-651, 677.

[20] 陈仕龙, 東洪春, 叶波, 等. 云广±800 kV 特高压直流输电系统 精确建模及仿真[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37 (2):43-48.

CHEN Shilong, SHU Hongchun, YE Bo, et al. Accurate modeling and simulation of Yunnan-Guangdong ±800 kV UHVDC transmission system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 37(2);43-48.

作者简介:

褚 旭(1988-),女,山东济宁人,博士研究生,主要研



究方向为电力系统继电保护(E-mail:chu.xu@ hotmail.com);

王 亮(1973—),男,河北保定人,高级 工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输 电控制保护技术(**E-mail**:wliang@epri.sgcc. com.cn);

把 王华伟(1971—),男,山东诸城人,高级 工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输

电控制保护技术(E-mail:whw3000@epri.sgcc.com.cn);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@ mail.xjtu.edu.cn)。

Analysis of inter-pole coupling effect and faulty pole selection for HVDC transmission line

CHU Xu¹, WANG Liang², WANG Huawei², SONG Guobing¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the inter-pole coupling effect of HVDC transmission line, a faulty pole selection scheme based on the electrical variables of single pole is proposed. The characteristic analysis of inter-pole coupling shows that, the coupling effect is related to the frequency of electrical variables: the higher the frequency is, the more obvious the coupling effect is. Theoretical spectrum analysis and simulative results show that, the content of low-frequency signals in the electrical variables of healthy pole is much lower than that of faulty pole, based on which, a faulty pole selection scheme based on the electrical variable of single pole is proposed and its criterion is given. The feasibility and validity of the proposed scheme are verified by the simulative results and field-recorded data.

Key words: HVDC power transmission; electric lines; inter-pole coupling; fault pole selection; low-frequency component; electrical variable of single pole

(上接第 139 页 continued from page 139)

萧 珺(1992—),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研 究方向为大型工业企业智能电网、大功率电力电子技术在电 力系统中的应用(E-mail:xiaojun9283@163.com); 毛承雄(1964—),男,湖北武穴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为大型同步发电机励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:cxmao@hust.edu.cn)。

High-quality power-supply for data center

LIU Shu¹, ZHANG Gaoyan², SHI Shan¹, TU Liming¹, WANG Yuanchao², XIAO Jun², MAO Chengxiong²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic

Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing power-supply scheme for data center normally needs both AC/DC and DC/AC conversions while the uninterrupted power-supply normally needs the inverter to supply power for loads. A high-quality power-supply scheme is proposed to improve its reliability and quality. The topological structure of the proposed scheme is given, based on which, its working principle and mathematical model are analyzed. A coordinated control strategy based on voltage compensation control, power balance between two power sources and emergency power-supply is presented and verified based on MATLAB/ Simulink. The research results show that, the proposed scheme compensates the voltage swell, voltage sag and harmonics of power grid very well, realizes the power balance between two power sources, and maintains the uninterrupted power-supply during the outage of both power sources.

Key words: data center; high-quality power-supply; coordinated control strategy; voltage compensation; coordinated power allocation; uninterrupted power-supply

146