

基于直流配电的核电厂应急配电系统研究

吴 茜, 于 艇, 王军庄, 褚少先, 孙 辉

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 安全问题一直是各核电厂最关注的问题。其中, 核电厂的应急配电系统在核电厂纵深防御体系中具有最重要的地位。当前, 在国内外核电厂中, 厂用电配电系统一般采用交流系统。交流系统虽是目前国内外各配电系统的主流方案, 但存在保护控制相对复杂、线路损耗大、电源接入限制条件多及具有共因故障风险等缺点。相比之下, 直流配电系统具有传输容量大、传输损耗率小、供电质量高、灵活友好接入和控制灵活等优势。针对核电厂的应急电源系统, 利用直流配电系统的特点和优势, 提出了一套基于直流方式的核电厂应急配电方案, 并通过仿真和试验对方案进行了验证, 可作为当前核电厂应急配电系统设计的参考。

关键词: 直流配电网; 核电; 应急配电

Research of DC emergency distribution system in nuclear plants

WU Xi, YU Ting, WANG Junzhuang, CHU Shaoxian, SUN Hui

(China Nuclear Power Design Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: The emergency distribution system plays the most important role in the deep defense system of nuclear plants, and is directly related to the safety of nuclear plants. Currently, in China and foreign nuclear plants, the power distribution system generally adopts an AC system. Although the AC system is the mainstream solution for various distribution systems, it also has some drawbacks, such as relatively complex protection and control, high line losses, multiple power access restrictions, and the risk of common faults. In contrast, DC distribution systems have advantages such as larger transmission capacity, lower transmission loss rate, higher power supply quality, flexible and friendly access and control. This article proposes a kind of DC emergency power distribution scheme for nuclear plants, which was verified through simulation and experiments. This scheme can serve as a reference for the current design of emergency distribution systems in nuclear plants.

Key words: DC distribution network; nuclear plants; emergency power distribution

0 引言

和常规电厂不同, 核电厂由于燃料的特殊性和敏感性, 安全问题一直是业内人士最关注的问题。其中, 应急配电系统在核电厂纵深防御体系中具有极其重要的地位。从负荷来看, 下游负荷一般均同核安全直接相关; 从应急工况来讲, 应急配电系统需要应对核电厂失去厂外电源、全厂

失电和事故后缓解等多种应急工况; 从电源接入上讲, 核电厂应急配电系统需要同时承接应急柴油发电机电源、SBO柴油发电机电源和全厂移动柴油发电机电源等多种应急电源的接入。因此, 核电厂应急配电系统的安全性和可靠性一直是各电厂最重要的要求。

当前, 在国内外核电厂中, 厂用电配电系统

一般采用交流系统。交流系统虽是目前国内外各配电系统的主流方案，但也存在保护控制相对复杂、电压波动大、线路损耗大、电源接入限制条件多和具有共因故障风险等缺点。相比之下，直流配电系统具有传输容量大、传输损耗率小、供电质量高、灵活友好接入和控制灵活等优势。

本文针对核电厂的应急电源系统，利用直流配电系统的特点和优势，提出了一套基于直流方式的核电厂应急配电方案，并通过仿真和试验对方案进行了验证。该方案可作为当前核电厂应急配电系统设计的参考。

1 研究方法

本文根据核电厂的实际运行方式以及不同运行工况下的负荷特性，结合直流配电系统的特点，开展了由直流应急配电系统替代现有交流应急配电系统的研究。研究方法如下。

(1) 确定直流应急配电接线方式

结合二、三代能动核电厂现有厂用电接线方式，针对核电厂全厂失电（Station Block Out, SBO）应急供电母线的需求，确定一套核电厂直流SBO应急配电系统接线方案。

(2) 确定直流应急配电系统的控制策略

根据直流应急配电系统的接线方式、电源、负荷类型和系统运行方式，对直流配电接线方案中的各典型模块单元开展控制策略研究，确定系统的控制策略。

(3) 直流应急配电系统的仿真

在MATLAB平台搭建直流厂用电模型，基于直流应急配电系统的接线方式和控制策略，对系统进行各种工况下的稳态和暂态仿真研究，针对核电厂各种不同运行工况进行仿真分析，从电源品质、系统稳定性和电厂切换条件适应性等维度对仿真结果进行评估，以验证系统接线方案和控制策略的可行性。

(4) 搭建试验平台进行平台验证

根据系统需求搭建直流配电试验平台，同时完成控制策略、电源切换、负荷加卸载和外部电

源接入分析。

研究流程图如图1所示。

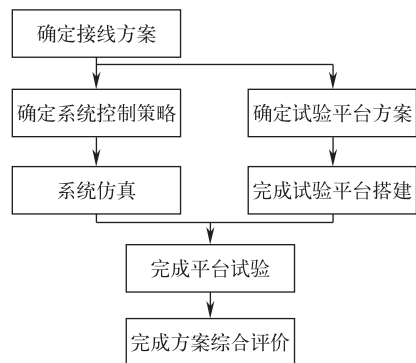


图1 研究方法流程图

Fig. 1 Flowchart of research method

2 方案研究

2.1 直流厂用电接线方案

本文参考二、三代核电机组现有交流厂用电接线方式及福岛事故后设计扩展工况的供电要求，针对能动核电厂SBO应急供电母线的需求，提出了基于直流方式的核电厂应急配电接线方案。

在现有核电机组交流应急配电方案中，电厂正常运行期间，A/B列SBO应急供电母线系统分别由上游对应列的10 kV应急母线供电。当核电厂的厂外电源和厂内应急柴油发电机电源均失去时，SBO柴油发电机起动，并向下游SBO应急母线及母线下交流负荷供电^[1]。

本文提供的核电厂直流厂用电配电方案如图2所示。

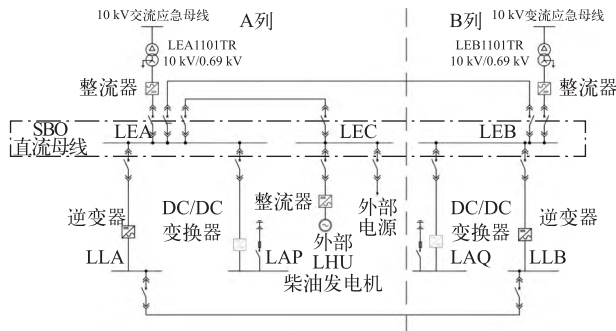


图2 直流厂用电接线方案

Fig. 2 DC power distribution scheme for plants

本方案中，用600 V直流配电系统LEA/LEB/LEC作为主母线，替代核电厂原SBO交流应急供电母线。同时，为实现和电厂厂用电系统其他交流部分的对接，本方案中另外增加了AC/DC、DC/AC和DC/DC等电源装置^[2]。直流厂用电配电方案中的各个系统进行了详细说明见表1。

表 1 直流配电系统各系统说明

Tab.1 The description of DC distribution system

系统编码	系统名称	设备描述
LHU	SBO 电源系统	SBO 柴油发电机组
LEA/LEB/LEC	DC 600 V 直流配电系统	包括低压厂用变压器、AC 380 V/DC 600 V 整流器、DC 600 V 直流配电盘
LLA/LLB	AC 380 V 交流配电系统	包括DC 600 V/AC 380 V 逆变器、AC 380 V 交流配电盘
LAP/LAQ	220 V 直流系统	包括DC/DC 变换器、220 V 直流配电盘、蓄电池

2.2 直流控制策略研究

核电厂直流配电接线方案中主要采用三类直流可控单元：①AC 380 V/DC 600 V整流器；②DC 600 V/AC 380 V逆变器；③DC/DC变换器。

2.2.1 AC 380 V/DC 600 V 整流器

AC 380 V/DC 600 V整流器的作用是将380 V交流电源转换为600 V直流电源，为直流应急配电系统供应稳定电能。

本方案中整流器采用三相桥式电路拓扑，以实现能量的双向传输，如图3所示。

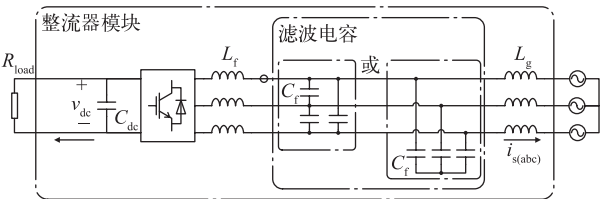


图 3 整流器模块电路拓扑

Fig. 3 Rectifier module circuit topology

设计核电厂整流器控制策略时，需要实现两

方面的目标：一方面是稳态下对直流侧电容电压与交流侧并网电流的单位功率因数的精准控制；另一方面是暂态下直流电压的快速响应与交流电流的限幅保护。

在脉冲宽度调制控制下，交流电流的低次谐波可以通过控制环内的计算被消去，基波分量可以通过锁相环的相位同步，控制单位功率因数^[3]。

为进一步追求暂态准确度与动态响应速度，为整流器设计直流电压环-交流电流环的双闭环控制结构，如图4所示。

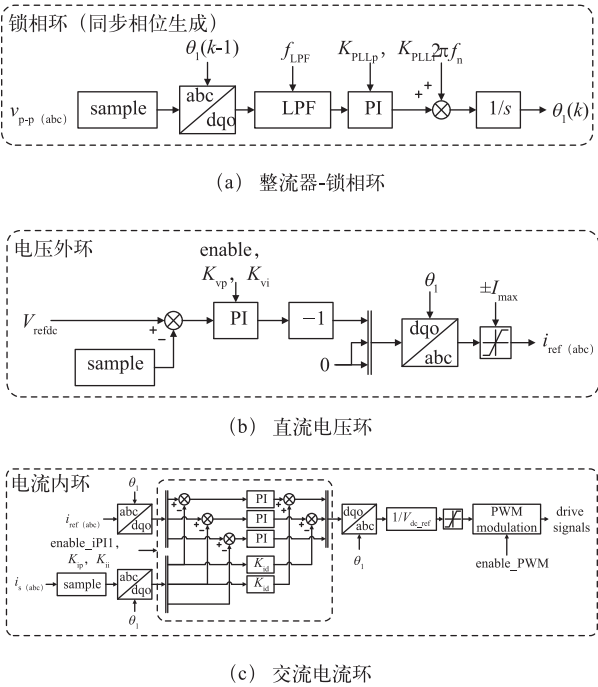


图 4 整流器模块控制框图

Fig. 4 Control block diagram of rectifier module

2.2.2 DC 600 V/AC 380 V 逆变器

逆变器主要作用：在直流配电方案中，将600 V的直流电压输入，转换成为50 Hz、380 V三相三线电压输出，为下游的380 V/220 V交流负荷供电。

由于两组逆变器不会同时为同一组负荷供电，因此本方案中对逆变器采用恒电压控制。逆变器拓扑结构与整流器相同，也采取三相桥式电路拓扑，其他要求类似。逆变器控制策略如图5所示^[4]。

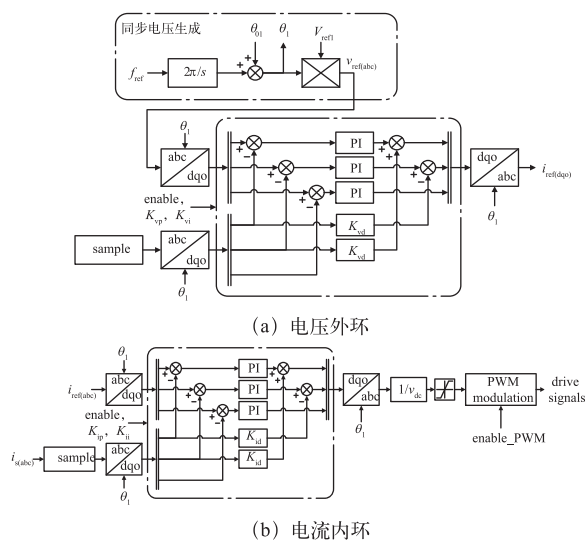


图5 逆变器模块控制框图

Fig. 5 Control block diagram of inverter module

2.2.3 DC/DC 变换器

DC/DC变换器是用来将直流母线600 V的电压转换成为220 V的直流电压输出，以向下游负荷提供220 V直流电源。同时，由于直流母线也接入蓄电池，通过控制DC/DC的双有源桥式（Dual Active Bridge，DAB）变换器还可以用来稳定母线电压，并实现对蓄电池的充电功能。

本方案采用数字控制DAB变换器，其示意图如图6所示。其中开关管S₁~S₄和Q₁~Q₄组成了两个H桥，它们通过磁网络连接。磁网络不仅提供了电气隔离，还起到电压匹配和能量存储的作用。数字控制器采用相移调制来控制开关管。

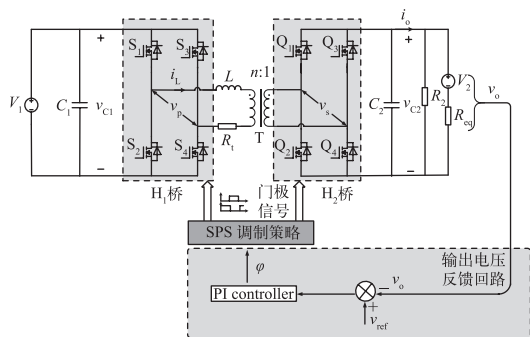


图6 DAB 变换器模块控制框图

Fig. 6 Control block diagram of DAB converter module

2.3 系统仿真

2.3.1 仿真工况

本文结合核电厂应急配电系统的实际运行情况，梳理出电厂的各种典型运行工况^[5]，见表2。

表2 核电厂典型运行工况

Tab. 2 Typical operating conditions of nuclear power plants

系统编码	系统名称
稳态运行	系统启动
	系统停运
	SBO 柴油机启动并加载
	完全丧失交流电
特殊运行	外部其他类型电源接入
	厂用电切换
	失去厂外电源工况
	大修期间交叉供电
正常运行时的故障暂态	上游交流电压波动
	上游短路故障、接地故障并切除
	各级母线故障、馈线故障及切除
	柴油机运行时的故障暂态
柴油机运行时的故障暂态	各级母线故障、馈线故障及切除

2.3.2 仿真结果分析

本文对表2中梳理的核电厂各典型运行工况分别进行了仿真，各工况下仿真波形如图7所示。

由各工况下SBO直流母线电压曲线可以看出：系统启动时，整流模块能在0.2 s内稳定输出直流电压，并在逆变器接入、DAB变换器的接入过程中能够保持电压稳定。

从图7b可以看出，在核电厂应急供电工况下，SBO柴油发电机可以在15 s内零状态平稳启动；在上游柴油发电机调节暂态中能快速对交流电压进行同步，并保持直流电压输出稳定；在接入负荷造成SBO柴油发电机输出电压跌落时，控制器可以保证电压在暂态时迅速恢复。

在正常运行时的故障暂态仿真中，本文模拟了正常运行工况下，上游大负荷突然起动引起的上游电压跌落的情况。从图7c可以看出，在这种工况下，整流器输出的直流电压在上游电压突变的瞬间有波动，但是波动幅度都在允许范围内，调节时间较快，很快系统恢复了稳定，并且DAB变换器的输出电压稳定在220 V左右。

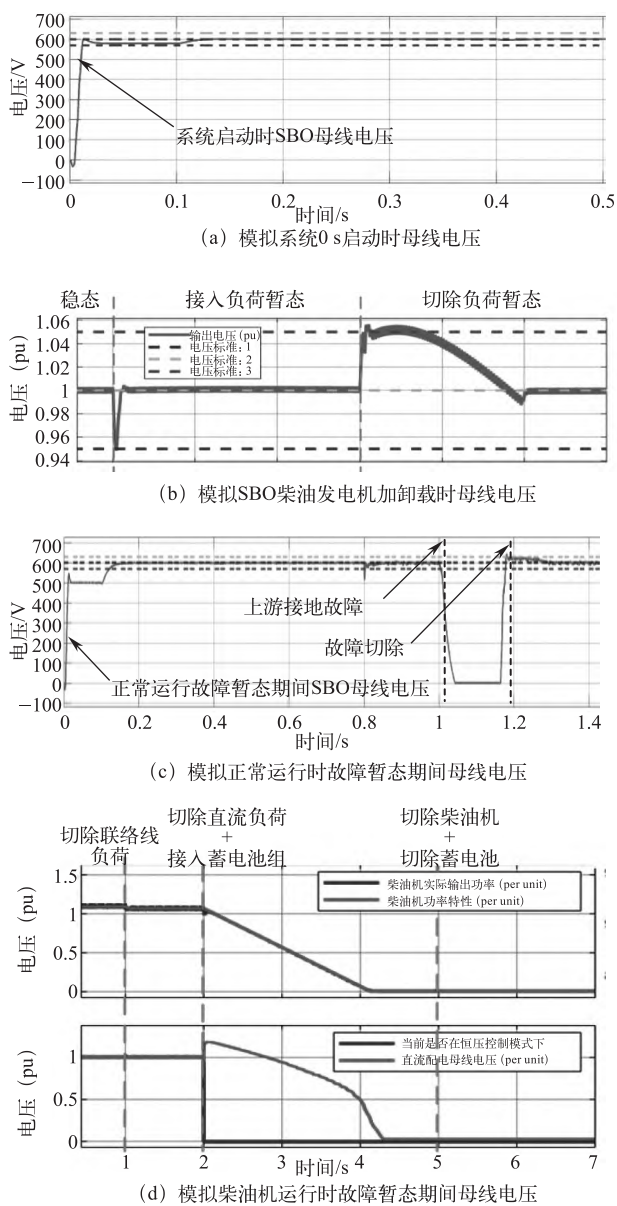


图 7 各典型工况下 SBO 直流母线电压曲线
Fig. 7 Voltage-curve of SBO bus under typical operating conditions

在柴油发电机运行时的故障暂态下，各级母线及其变换器、负荷切除造成的功率突变与柴油发电机组功率输出惯性之间的差异需由蓄电池进行补偿。在从满载切换至空载的工况下，柴油发电机输出电压可在2.5 s内结束调节，全程电压超调在20%以内。

汇总各工况下仿真试验结果分析见表3。

从图7和表3可以看出，各典型运行工况下，直流应急配电系统均可满足核电厂对各工况的响

应时间要求和电压波动要求。仿真结果证明直流应急配电系统可行。

表 3 仿真试验结果
Tab. 3 Simulation results of typical operating conditions

运行方式	仿真试验	仿真结果
稳态运行	系统启动	系统可以正常自上而下的启动
	系统停运	系统可以正常自下而上停运
SBO 柴油发电机启动并加载		搭建了基于实际暂态特性的等效模型，其中 SBO 柴油机可以实现正常的启动并加载；同时还仿真了上游 10 kV 柴油机暂态及整流器快速同步、SBO 柴油机暂态及直流稳压控制等工况
	完全丧失交流电源	系统可以实现交流电丧失时，蓄电池向负荷放电
	外部其他类型电源接入	在正常 / 应急运行工况下，对光伏接入的工况进行了系统的仿真
	特殊运行	系统可以在正常工况下，在上游失电 4.5 s 后，重新恢复正常工作
失去厂外电源工况	厂用电切换	系统在失电 20 s 内，蓄电池对直流负荷进行放电。同时对柴油发电机的正常启动进行了系统的仿真
		系统可以在正常运行工况下，A 列停盘维修，通过 LLA 与 LLB 之间的联络线，实现 A-B 列之间的交叉供电，保证了 A 列的交流负荷的供电
大修期间交叉供电	上游交流电压波动	系统可以在上游电压由额定电压降低至 85% 时，保持系统的稳定运行，在持续 10 s 后恢复正常运行
	正常运行时的故障暂态	上游短路故障、接地故障并切除
柴油发电机运行时的故障暂态		系统可以在上游电压保持恒定后，稳定正常工作
		对系统的 600 V 直流母线失电等故障进行了仿真，变换器可以实现对故障的识别及停止功能
柴油发电机运行时的故障暂态	各级母线故障、馈线故障及切除	系统可以在应急运行工况下（柴油发电机运行时），直流配电系统下游回路故障或母线故障的切除
	柴油发电机运行时的故障暂态	各级母线故障、馈线故障及切除

2.4 试验验证

2.4.1 试验方法

为验证直流应急配电方案的可行性，本文除采用 MATLAB 软件仿真外，还实际搭建了一个直流配电试验平台进行验证。

试验平台的接线方式在图2的基础上进行了

等效和简化，如图8所示。

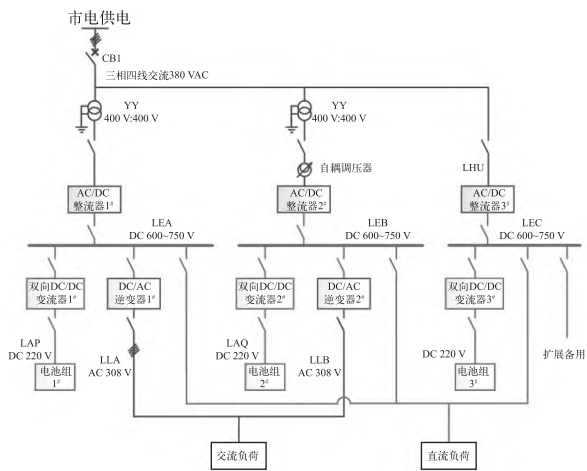


图 8 直流试验平台接线方式
Fig. 8 Distribution plan for DC test platform

- 平台的设备配置：
- 1) 1台额定电压400 V、容量50 kV·A的自耦调压器。通过自耦变压器电压调节模拟上游突加负荷造成的电压跌落。
 - 2) 3套30 kW的AC/DC整流器。交流侧电压380 (1±15%) V，直流侧输出电压为600~750 V；将外部上游交流电整流后，为直流母线LEA/LEB/LEC供电。
 - 3) 2套30 kW的DC/AC逆变器，逆变后为SBO应急直流母线下游的交流负荷供电。逆变器直流输入电压为600~750 V；交流输出电压为380 (1±15%) V。
 - 4) 3套额定容量为30 kW的DC/DC变流器，为不同电压等级的直流负荷供电。其中高频隔离DC/DC变流器1台，非隔离DC/DC变流器2台；一侧直流电压为600~750 V；另一侧输出直流电压为(220±5) V。
 - 5) 3套电池单元采用铅酸蓄电池。电压为220 V，容量为100 A·h。
 - 6) 试验平台另外配置了交流负荷和直流负荷各1套，交直流负荷均包含1套30 kW电阻装置和1台2 kW左右的电动机。电阻装置可根据监控系统设定值自动切换至不同档位，5 kW为一档；交流电动机和直流电动机负荷均可根据监控

系统设置起停逻辑^[6]。
在平台上开展的验证试验和试验模拟的工况见表4。

表 4 直流应急配电方案试验	
Tab. 4 Test items of DC emergency distribution system	
试验项目	模拟工况
系统启动试验	正常运行启动
系统停运试验	正常运行停运
应急母线启动加载试验	应急工况下 SBO 柴油发电机启动加载
备用蓄电池接入试验	外部电源接入
交流电源停电试验	完全失去交流电
交流电源短时失电试验	厂用电切换、上游应急柴油机启动
上游交流电源波动试验	厂用电大负荷启动
上游交流电压波动试验	下游短路故障及切除
短路试验	系统可以在上游电压保持恒定后，稳定正常工作

2.4.2 试验结果

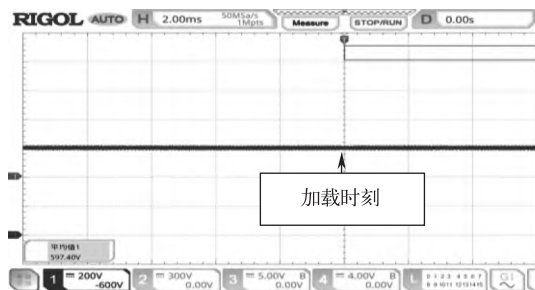
各模拟工况下SBO直流配电母线电压波形如图9所示。

由图9a可以看出，在启动A列后，LEA的直流母线电压稳定在598 V，满足偏差值不超过设定值600 V的±3%，与对应的仿真结果一致。在LEA直流母线电压稳定后，在A列挂上5 kW直流负荷，直流母线电压稳定在597 V，加载前后母线电压波动不大，满足偏差值不超过设定值600 V的±5%的要求，与对应的仿真结果一致。

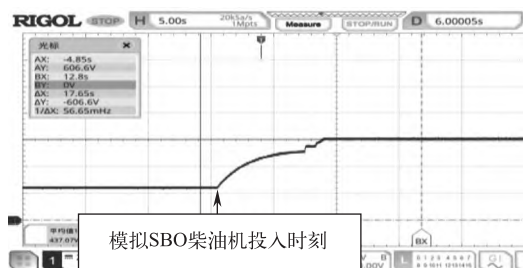
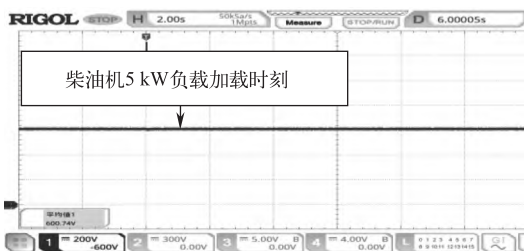
由图9b试验波形可以看出，在C列LEC系统未投入，LEC母线由蓄电池进行供电，保持在蓄电池的供电电压240 V左右，满足设定值，之后很快上升并稳定在600 V，满足电压不超过设定值的±3%的要求，与仿真结果一致。由上述试验波形可以看出，在LEC系统投入5 kW的直流与交流负荷后，LEC系统的直流母线电压并未产生太大的波动，稳定在电压设定值的±5%以内。

图9c为上游交流电源波动试验电压波形，该试验用于模拟核电厂厂用电系统大电动机起动引起的电压波动。上游10 kV母线在大功率设备启动时，母线电压瞬间降至额定电压的约90%，并伴随电动机启动逐步恢复。该试验通过LEB上游

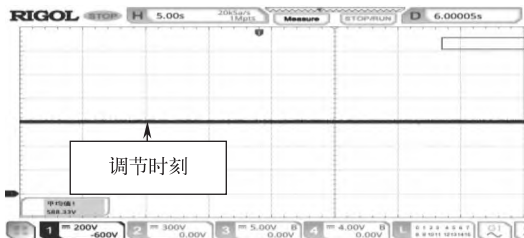
配置的自耦调压器实现电压的波动。



(a) 模拟A列系统0 s启动时母线电压



(b) 模拟SBO柴油机起动并加载时母线电压



(c) 模拟上游交流电压波动时SBO直流母线电压

图9 各试验工况下SBO直流母线电压曲线

Fig. 9 Voltage-curve of SBO bus under various test operating conditions

由上述结果可以看出, 在自耦调压器从6档调到1档, 即将供电电压调至额定电压的90%后, LEB的直流母线电压基本不发生波动变化, 稳定在设定值附近, 与MATLAB仿真结果一致。

2.4.3 试验小结

本研究根据表4在试验平台上共开展了9项试验内容。模拟了核电厂正常运行和故障运行时的各种典型工况。在9项试验中, 模拟的SBO直流

母线电压均能满足电厂对电源品质的要求, 各种应急和事故工况下都可以按照要求实现电源的启动和带载, 试验结果和仿真结果一致, 证明了直流配电方案可以满足核电厂运行的需求。

3 结束语

本文针对核电厂SBO应急供电母线的需求, 提出了基于直流方式的核电厂应急配电接线方案, 对方案中各典型可控单元设计出合适的控制策略。然后分别通过MATLAB软件和试验平台, 对直流应急配电接线方案和控制策略进行了仿真和试验验证。仿真和试验的结果证明了直流应急配电方案的可行性, 为后续核电项目厂用电系统的设计提供了参考。

参考文献

- [1] 堵树宏, 杨庆明. 核电厂设计扩展工况供电要求分析[J]. 核科学与工程, 2020, 40(4): 652-658.
- [2] 于艇, 刘晨, 叶育林. 核电厂核岛不间断电源系统接地故障分析[J]. 电气应用, 2020, 39(10): 99-105.
- [3] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 19-25, 47.
- [4] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3112.
- [5] 中国国家能源局. 核电厂应对全厂断电设计准则: NB/T 20066[S]. 北京: 中国国家能源局, 2012.
- [6] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 82-88.

作者简介

吴茜 (1986—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为核电厂电气二次设计、消弧线圈设计、小电流接地与选线研究。

(收稿日期: 2023-05-18)