

南京 UPFC 工程运行方式

凌峰¹, 秦健¹, 戴阳¹, 何宏杰¹, 黄如海², 潘磊²

(1. 江苏省电力公司, 江苏南京 210024; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102)

摘要: 南京统一潮流控制器(UPFC)工程是中国首套 UPFC 工程,也是世界上首套采用模块化多电平(MMC)拓扑的 UPFC 工程,用于解决南京西环网输电潮流不均问题。南京 UPFC 工程采用基于多换流器可切换的优化结构,具有多种运行方式,灵活性和可靠性高,但带来了一定的复杂性,从而对南京 UPFC 工程运行方式的研究极为必要。文中详细介绍了南京 UPFC 工程采用的 5 种运行方式和设置方法,研究设备故障时的系统处理策略,针对不同区域设备检修或故障分析系统最优的运行方式。研究结果可作为后续 UPFC 工程运行方式分析和选择的参考。

关键词: UPFC; 静止同步补偿器; 静止同步串联补偿器; 运行方式

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2015)06-0036-05

统一潮流控制器(UPFC)是一种能够独立、快速、精确、连续控制系统电压和潮流的第三代柔性交流输电(FACTS)装置,它能控制线路电流,最大化电网传输能力;阻尼系统振荡,提高电网稳定性;提供紧急功率支援,避免大规模切负荷;优化潮流,减少环流,降低网络损耗。因此 UPFC 装置可以充分挖掘现有电网潜力,节省输电走廊,推动电网建设向环境友好型发展^[1-3]。南京西环网统一潮流控制器示范工程是国内首套 UPFC 工程,也是世界上首套基于模块化多电平(MMC)换流器的 UPFC 工程,总容量 $3 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$,安装于 220 kV 铁北站,用于解决南京西环网的潮流不均问题,其建设成本仅为增加新的输电走廊投资的五分之一。

南京 UPFC 工程采用基于多换流器、可切换的优化双回路系统结构,3 个换流器互为备用,通过转换刀闸可改变各换流器的交流侧连接方式,能以 UPFC、静止同步补偿器(STATCOM)或静止同步串联补偿器(SSSC)等多种方式运行,经济性、灵活性和可靠性高。高灵活性必然会带来一定的复杂性。目前有关 UPFC 方面的文献基本聚焦于具体运行方式下控制策略和保护策略的研究^[4-7],对运行方式的选择和切换研究尚属空白。因此以南京 UPFC 具体工程为对象,研究 UPFC 运行方式的选择和切换策略十分必要。

1 南京 UPFC 工程主接线

南京 UPFC 工程的优化双回结构示意图如图 1 所示。3 个互为备用的 MMC 换流器 C1、C2、C3 可以通过转换刀闸与 3 个交流侧相联接。3 个交流侧分别是 W1 并联交流侧、W2 串联 I 交流侧和 W3 串联 II 交流侧。

并联交流侧采用 2 台并联变压器互为备用,分别

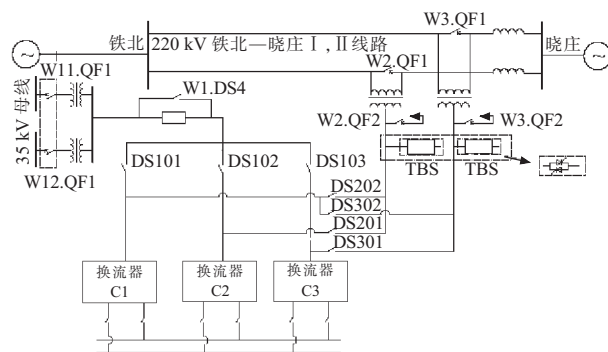


图 1 南京 UPFC 工程主接线示意图

接至燕子矶站的 2 条 35 kV 母线。正常情况下,1 台并联变压器运行、另 1 台热备用,当运行并联变压器故障或网侧失电时,通过备自投功能可以快速切换至备用变压器。2 个串联交流侧各安装 1 台串联变压器(26.5 kV/20.8 kV),通过其高压侧绕组串联接入 220 kV 线路,串联变压器高压侧分相,低压侧采用星型接法并经高阻接地。串联变压器两侧各配置 1 台机械旁路断路器(W2/W3.QF1 和 W2/W3.QF2),用于隔离换流器与串联线路。同时,串联变压器低压侧与中性点间配置 1 台三相晶闸管旁路开关(TBS),用于对换流器进行快速保护。

3 个换流器采用完全相同的结构和容量,均可接入并联交流侧,C1 可接于 2 个串联交流侧,C2 和 C3 分别接于串联 I 交流侧和串联 II 交流侧。

2 南京 UPFC 工程运行方式

为了方便设置 UPFC 系统的运行方式(以下简称“站运行方式”),南京 UPFC 工程为运行人员提供各换流器的运行模式和接线方式的选择,如图 2 所示。其中接线方式增加“停用”,表示换流器不接入任何交流侧。“停用”状态下换流器的运行模式不考虑。

南京 UPFC 系统有 5 种站运行方式,即双回路

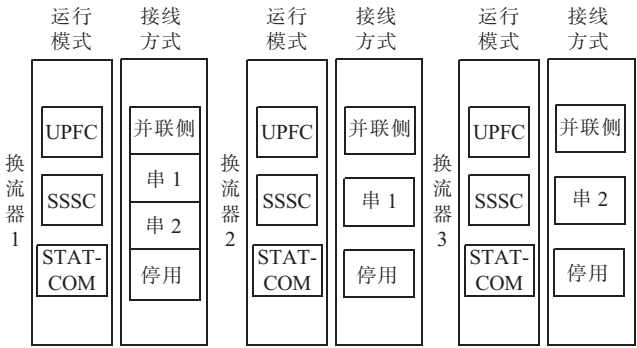


图 2 换流器运行模式和接线方式图

UPFC 运行方式、单回 (线路 I/ 线路 II)UPFC 运行方式、双回线路 SSSC 运行方式、单回 (线路 I/ 线路 II) SSSC 运行方式以及 STATCOM 运行方式。站运行方式和各换流器的运行模式与接线方式的对应关系如表 1 所示。

2.1 UPFC 运行方式

2.1.1 双回线路 UPFC 运行方式

双回线路 UPFC 运行方式是南京 UPFC 工程的主运行方式。如图 3 所示,换流器 C1 接入并联交流侧,换流器 C2 接入串联 I 交流侧,换流器 C3 接入串联 II 交流侧。所有换流器的直流侧连接至公共直流母线。并联交流侧的一台并联变压器运行,另一台热备用,启动电阻旁路刀闸 W1.DS4 合位;串联交流侧的串联变压器两侧旁路开关分位,TBS 阀带电保持不触发状态。该运行方式下,并联侧主要起支撑公共直流母线电压作用,同时对并联交流侧电网进行无功补偿;串联侧控

制其串联接入的线路的潮流,有功功率和无功功率可独立控制。

2.1.2 单回线路 UPFC 运行方式

当某条线路故障或检修时,南京 UPFC 系统可运行于单回线路 UPFC 运行方式。如图 4 所示。以铁北—晓庄 II 线退出运行为例,选择换流器 C1 和 C2 投入运行。此时换流器 C1 接入并联交流侧,换流器 C2 接入串联 I 交流侧,换流器 C3 停用。换流器 C1 和 C2 的直流侧连接至公共直流母线。并联交流侧的一台并联变压器运行,另一台热备用,启动电阻旁路刀闸 W1.DS4 合位;串联 I 交流侧的串联变压器两侧旁路开关分位,TBS 阀带电保持不触发状态;串联 II 交流侧的串联变压器网侧旁路开关合位,UPFC 系统与铁晓 II 线隔离。该运行方式下,并联侧仍然起支撑公共直流母线电压作用,同时对并联交流侧电压起一定的无功补偿能力;串联侧控制其串联接入的线路的潮流,有功功率和无功功率可独立控制。

2.2 STATCOM 运行方式

在不需要对西环网进行潮流控制时,南京 UPFC 系统还可运行于 STATCOM 运行方式,对电网提供一定的无功补偿。受限于并联变压器的容量,仅允许 1 台换流器投入 STATCOM 运行。如图 5 所示,选择换流器 C2 投入运行为例。换流器 C2 接入并联交流侧,换流器 C1 和 C3 停用。所有换流器的直流侧均隔离。并联交流侧的一台并联变压器运行,另一台热备用,启动电阻旁路刀闸 W1.DS4 合位;串联交流侧的串联变压

表 1 站运行方式与换流器模式对应关系

站运行方式	换流器 1							换流器 2							换流器 3						
	UPFC	SSSC	STAT-COM	并联侧	串 1	串 2	停用	UPFC	SSSC	STAT-COM	并联侧	串 1	停用	UPFC	SSSC	STAT-COM	并联侧	串 2	停用		
双回 UPFC	●			●				●				●		●				●			
线路 I UPFC	●			●				●				●							●		
	●				●								●	●			●				
线路 II UPFC							●	●				●		●			●				
	●			●									●	●				●			
							●	●			●			●				●			
双回 SSSC						●		●				●				●		●			
		●			●								●		●			●			
		●				●		●				●							●		
线路 I SSSC							●	●				●							●		
		●			●								●						●		
线路 II SSSC							●						●		●			●			
		●				●							●						●		
STAT COM			●	●									●						●		
							●			●	●								●		
							●						●			●	●				

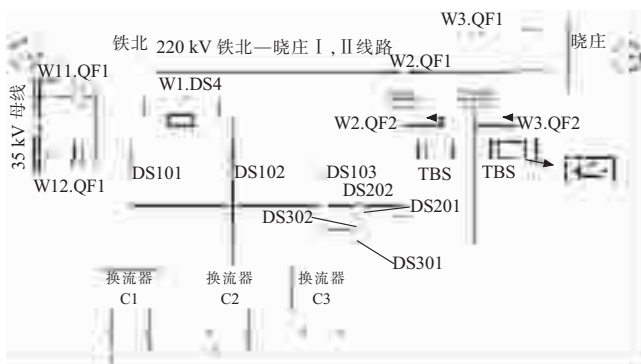


图 3 双回线路 UPFC 运行方式

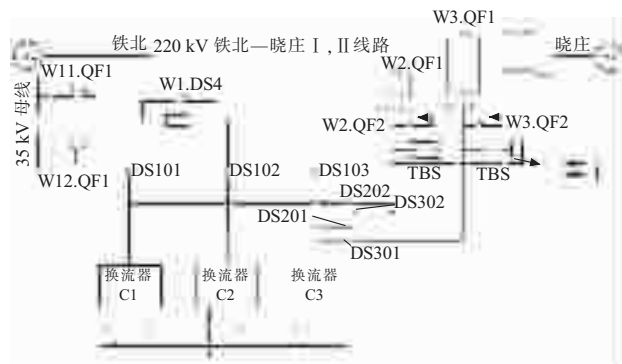


图 6 双回线路 SSSC 运行方式

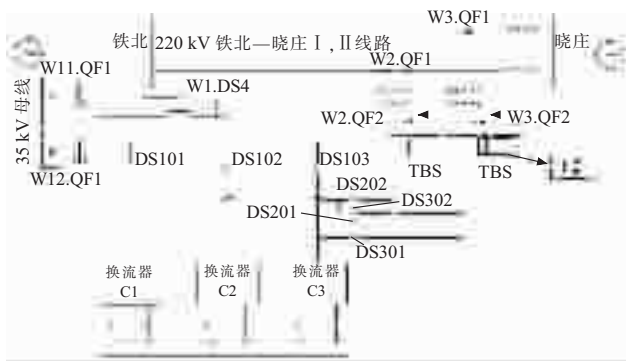


图 4 单回线路 UPFC 运行方式

器网侧旁路开关合位,UPFC 系统与双回线路隔离。该运行方式下,并联侧主要对并联交流侧电网进行无功补偿或者交流电压控制。

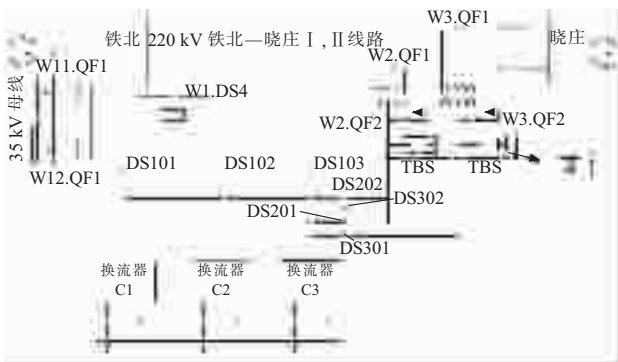


图 5 STATCOM 运行方式

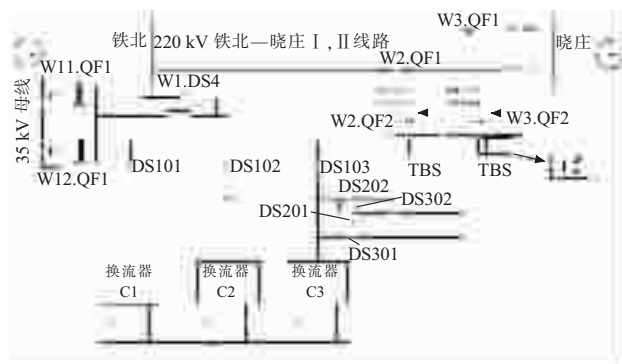


图 7 单回线路 SSSC 运行方式

2.3 SSSC 运行方式

2.3.1 双回线路 UPFC 运行方式

当某个换流器检修时,为保证双回线路潮流控制,南京 UPFC 系统可运行于双回线路 SSSC 运行方式。如图 6 所示,以换流器 C1 检修为例,换流器 C2 和 C3 投入运行。换流器 C2 接入串联 I 交流侧,换流器 C3 接入串联 II 交流侧,换流器 C1 停用。所有换流器的直流侧均隔离。并联交流侧的 2 台并联变压器均热备用,启动电阻旁路刀闸 W1.DS4 分位;串联交流侧的串联变压器两侧旁路开关分位,TBS 阀带电保持不触发状态。该运行方式下,并联侧主要为换流器启动时进行充电,正常运行后可改变状态;串联侧控制其串联接入的线路的潮流,但仅线路有功功率可控,线路的无功功率会随着所控制的有功变化而改变。

2.3.2 单回线路 SSSC 运行方式

当某条线路故障或检修,同时换流器仅剩 1 个可用时,南京 UPFC 系统可运行于单回线路 SSSC 运行方式。如图 7 所示,以铁北—晓庄 II 线退出运行,换流器 C2 和 C3 检修为例,换流器 C1 投入运行。换流器 C1 接入串联 I 交流侧,换流器 C2 和 C3 停用。所有换流器的直流侧均隔离。并联交流侧的 2 台并联变压器均热备用,启动电阻旁路刀闸 W1.DS4 分位;串联 I 交流侧的串联变压器两侧旁路开关分位,TBS 阀带电保持不触发状态。该运行方式下,并联侧主要为换流器启动时进行充电,正常运行后可改变状态;串联 I 侧控制其串联接入的线路的潮流,仅有有功功率可控,线路的无功功率会随着所控制的有功变化而改变。

3 南京 UPFC 系统运行方式转换方案

为了方便研究南京 UPFC 系统运行方式的转换方案,可以从主设备故障的角度进行详细分析。

3.1 线路故障

3.1.1 220 kV 线路故障

南京 UPFC 系统正常运行在双回线路 UPFC 运行方式。当铁北—晓庄 I 线或 II 线的线路发生故障时,UPFC 系统会根据故障类型及严重程度进行重启或运行方式自动切换。当某回线发生瞬时故障或邻近线路故障后,故障电流会通过串联变压器耦合到换流器,UPFC 系统保护迅速动作,停运串联接入该线路的换流器,其他换流器继续运行。同时 UPFC 系统会自动根据故障特性判断故障的原因,若为线路故障(本线或者

相邻线路),则进入停运换流器的重启逻辑,等待线路重合闸成功后,重新启动该换流器。重启成功后,UPFC 系统保持双回线路 UPFC 运行方式运行。

当某回线发生永久故障时,UPFC 系统仍按照上述逻辑处理,当判断出线路重合闸失败或者不重合时,永久停运该换流器。同时,UPFC 系统会自动切换为“准”单回线路 UPFC 运行(此时站运行方式仍然为双回线路 UPFC),该方式与 1.1.2 节定义的单回线路 UPFC 运行方式不同的是,故障线路对应的串联变压器阀侧的 W2/W3.QF2 合位,停用换流器的直流侧和交流侧仍然保持联接。在该回线路故障消除后需恢复双回线路 UPFC 运行时,可无需停运整个 UPFC 系统,而是手动操作 W2/W3.QF2 断开,快速地切换至双回线路 UPFC 运行。如需转换成单回线路 UPFC 运行方式,则只能手动停运 UPFC 系统,将该故障线路对应换流器的交、直流侧均隔离后再切换方式。

3.1.2 35 kV 进线故障

当并联交流侧发生线路故障时,若母线不失电,南京 UPFC 系统会自动抑制流过并联侧换流器的故障电流,UPFC 系统继续运行;若运行的并联变压器对应母线失电,则 UPFC 系统启动备自投逻辑,切换并联侧换流器接入另一台热备用的变压器、以接至另一条正常的母线,此过程 UPFC 系统持续运行。以上情况下,UPFC 系统一直保持双回线路 UPFC 运行方式运行。若并联交流侧进线故障导致 2 条母线均失电,UPFC 系统会停运所有换流器,220 kV 串联线路潮流将不再受控,恢复成自然潮流。

3.2 换流器故障

当换流器发生故障,南京 UPFC 系统保护迅速动作,停运所有换流器。若只有 1 个换流器故障,则可手动将故障换流器的交流侧和直流侧均隔离后,以双回线路 SSSC 运行方式重新投入运行;若有 2 个换流器故障,则可选的运行方式为单回线路 SSSC 运行方式(需人为停运一条线路)或 STATCOM 运行方式。

3.3 变压器故障

3.3.1 并联变压器故障

若运行中的并联变压器故障,则 UPFC 系统备自投动作,切换至另一台热备用的并联变压器,UPFC 系统可持续运行,整个过程无需运行人员干预。当 2 台并联变压器均故障,UPFC 系统保护迅速动作,停运所有换流器。此时,UPFC 系统只能保持站停运状态,待至少 1 台并联变压器检修完成后投入使用。

3.3.2 串联变压器故障

当某条线路的串联变压器发生故障,UPFC 系统保护迅速动作,停运联接该故障变压器的换流器,其他换流器继续运行。此时系统处于一条线路被控另一条

线路不控的状态,UPFC 系统对系统潮流的控制能力将失效,需手动停运其他换流器后,保持站停运状态或选择其他运行方式。此时可选的运行方式为单回线路 UPFC 运行方式(需人为停运不能被控的线路)或 STATCOM 运行方式;若 2 个串联变压器均故障,则只能选择 STATCOM 运行方式。

3.4 设备故障停运后运行方式选择

上述切换方案均是在南京 UPFC 系统正常运行时发生故障后的处理策略。设备故障停运后,南京 UPFC 系统站运行方式选择的建议表如表 2 所示。

表 2 南京 UPFC 系统运行方式选择建议表

序号	故障设备	站运行方式	换流器 1	换流器 2	换流器 3
1	无故障	双回线路 UPFC	并联侧	串联 I 侧	串联 II 侧
2	铁晓 I 线故障	单回线路 UPFC	并联侧	停用	串联 II 侧
3	铁晓 II 线故障	单回线路 UPFC	并联侧	串联 I 侧	停用
4	并联侧进线 1 或 2 故障	双回线路 UPFC	并联侧	串联 I 侧	串联 II 侧
5	1 台并联变故障	双回线路 UPFC	并联侧	串联 I 侧	串联 II 侧
6	串联变 1 故障	单回线路 UPFC(铁北—晓庄 I 线陪停)	并联侧	停用	串联 II 侧
7	串联变 2 故障	单回线路 UPFC(铁北—晓庄 II 线陪停)	并联侧	串联 I 侧	停用
8	换流器 1 故障	双回线路 SSSC	停用	串联 I 侧	串联 II 侧
9	换流器 2 故障	双回线路 SSSC	串联 I 侧	停用	串联 II 侧
10	换流器 3 故障	双回线路 SSSC	串联 II 侧	串联 I 侧	停用
11	铁晓双回线故障	STATCOM	并联侧	停用	停用
12	并联侧进线 1 和 2 均故障	停用	停用	停用	停用
13	2 台并联变故障	停用	停用	停用	停用
14	2 台串联变故障	STATCOM	并联侧	停用	停用
15	换流器 1,2 故障	单回线路 SSSC(铁北—晓庄 I 线陪停)	停用	停用	串联 II 侧
16	换流器 1,3 故障	单回线路 SSSC(铁北—晓庄 II 线陪停)	停用	串联 I 侧	停用
17	换流器 2,3 故障	单回线路 SSSC(铁北—晓庄 II 线陪停)	串联 I 侧	停用	停用
18	换流器 1、串变 1 故障	单回线路 UPFC(铁北—晓庄 I 线陪停)	停用	并联侧	串联 II 侧

表 2 续 南京 UPFC 系统运行方式选择建议表

序号	故障设备	站运行方式	换流器 1	换流器 2	换流器 3
19	换流器 2、 串变 1 故障	单回线路 UPFC(铁 北—晓庄 I 线陪停)	并联侧	停用	串联 II 侧
20	换流器 3、 串变 1 故障	单回线路 UPFC(铁 北—晓庄 II 线陪停)	并联侧	串联 I 侧	停用
21	换流器 1、 串变 2 故障	单回线路 UPFC(铁 北—晓庄 II 线陪停)	停用	串联 I 侧	并联侧
22	换流器 2、 串变 2 故障	单回线路 UPFC(铁 北—晓庄 II 线陪停)	串联 I 侧	并联侧	并联侧
23	换流器 3、 串变 2 故障	单回线路 UPFC(铁 北—晓庄 II 线陪停)	并联侧	串联 I 侧	停用
24	N-3 故障	停用	停用	停用	停用

4 结束语

南京 UPFC 系统可选的运行方式较多，具备较好的灵活性和高可靠性，但同时也增加了控制和运行的复杂性。从设备故障的角度对运行方式的切换进行设计和建议，针对性强、实用性高。调度人员可依据本文的研究结果对南京 UPFC 系统的运行方式进行设定，简化了判断和选择逻辑。同时也可作为其他 UPFC 工程运行方式设计的参考。

The Operation Modes for Nanjing UPFC Project

LING Feng¹, QIN Jiang¹, DAI Yang¹, HE Hongjie¹, HUANG Ruhai², PAN Lei²
(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;
2. Nanjing Nari-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in Nanjing west power grid, the first unified power flow controller (UPFC) in china is built, which is also the first UPFC project using MMC topology in the world. With multiple converters Nanjing UPFC has many operating modes. Considering the high flexibility, reliability and complexity of the UPFC project, it is necessary to research its operating modes. The five operating modes are introduced, and the settling method for main device failures is discussed. The research can be taken as a reference for the future UPFC projects.

Key words: unified power flow controller (UPFC); static synchronous compensator (STATCOM); static synchronous series compensator (SSSC); operating mode

参考文献:

[1] 郭建波. 我国大电网技术发展研讨[C]. 第二届中国电力发展和技术创新院士论坛. 北京:中国电力科学研究院,2011:1-12.
[2] 崔福博,郭剑波,荆平,等. MMC-UPFC 接地设计及站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1628-1636.
[3] ABDEL A E, SHALOM Z, LASZLO G, et al. Squeezing More Power from the Grid[J]. IEEE Power Engi-neering Review, June 2002,22(6):4-6.
[4] 杨杰. 电压源换相高压直流输电交直流系统故障特性研究[D]. 北京:清华大学,2010.
[5] 潘磊,李继红,田杰,等. 统一潮流控制器的平滑启动和停运策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):159-164.
[6] 张振华,江道灼. 基于 MMC 拓扑的 UPFC 控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,39(3):73-77.
[7] 沈忱,江道灼,吕文韬,等. 限流式统一潮流控制器的启停控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):101-105.

作者简介:

凌峰(1971),男,江苏无锡人,高级工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
秦健(1970),男,江苏启东人,高级工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
戴阳(1978),男,江苏泰州人,工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
何宏杰(1981),男,浙江德清人,高级工程师,从事电网工程建设管理、智能电网应用、电网新技术应用等方面的工作;
黄如海(1987),男,江苏南通人,工程师,研究方向为超高压直流输电、柔性直流输电和柔性交流输电;
潘磊(1985),男,湖北荆州人,工程师,从事柔性直流输电及柔性交流输电技术研究工作。

广 告 索 引

统一潮流控制器重大科技示范工程		南京南瑞继保电气有限公司	前插 3
—— 南京 220 kV 铁北变电站	封一	江苏省送变电公司	前插 4
国网江苏省电力公司经济技术研究院	封二	江苏省电力设计院	(黑白) 文前
国网江苏省电力公司电力科学研究院	前插 1	远东电缆有限公司	封三
江苏方天电力技术有限公司	前插 2	南瑞科技股份有限公司	封四