500 kV 苏南 UPFC 控制功能研究及性能试验

李　群，林金娇，李　鹏
（国网变电站智能设备检测技术重点实验室
（国网江苏省电力有限公司电力科学研究院），江苏 南京 211103）

摘　要：为解决苏州南部 500 kV 电网供电能力提升、特高压直流功率消纳等问题，投运了世界首套 500 kV 统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）工程。本文针对苏南 500 kV UPFC 工程应用情况，结合电网潮流调节需求分析，梳理了 UPFC 系统关键控制性能指标及控制功能要求，并在工程系统试验期间对相关的控制功能和性能进行重点测试，主要包括：苏南 UPFC 工程稳态控制精度、动态响应指标等基本性能指标，以及 $N-1$ 紧急功率控制、电网故障 UPFC 闭锁及自动重启动控制的功能和性能等，用于检验 UPFC 控制能力及运行效果，并为后续工程建设、标准规范制定累积了重要实践经验和数据。

关键词：统一潮流控制器；苏南 UPFC 工程；控制系统；系统试验
中图分类号：TM73　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3203（2018）06-0013-07

0　引言

随着电网的发展，关键输电断面输电能力不足、新建输电通道受限将成为普遍问题。统一潮流控制器（unified power flow controller，UPFC）作为最新一代柔性交流输电系统装置，综合了柔性交流输电设备（flexible AC transmission system，FACTS）的多种灵活控制手段，为解决这一问题提供了有效手段[1-5]。电网运行对高可靠、易维护的高压大容量 UPFC 技术的需求日益迫切。近年来，随着换流器技术发展，模块化多电平换流器（modular multilevel converter，MMC）采用模块化结构，其可扩展性强，而柔性输电技术在高电压大功率输电领域的应用推广，也推动了新一代 UPFC 技术的发展和应用[6-7]。通过 UPFC 关键技术研究，我国研制了世界首套基于 MMC 技术的 UPFC 成套设备，并于 2015 年 12 月在南京 220 kV 电网实现示范应用，解决了 220 kV 南京电网潮流缺乏灵活有效控制手段的问题，为南京电网供电能力提升发挥了重要作用，并为在更高电压等级电网应用 UPFC 积累了运行经验[8-9]。

随后，结合苏州 500 kV 南部电网供电能力提升、特高压直流功率消纳等问题，开展了 UPFC 在苏南 500 kV 电网中应用研究，并于 2017 年 12 月，投运了世界上电压等级最高、容量最大的 UPFC 工程——500 kV 苏南 UPFC。本文针对苏南 500 kV UPFC 工程应用情况，开展其控制功能需求分析，梳理 UPFC 基本控制性能指标及控制要求，并通过系统调试验证其实际控制性能和运行效果，为后续工程建设、标准制定累积了重要参考和数据。

收稿日期：2018-07-29；修回日期：2018-08-28
基金项目：国家自然科学青年基金资助项目（51707090）

1　苏南 UPFC 工程

苏州南部电网是苏州电网的重要组成部分，其负荷约占苏州电网的 70%，主要电源为锦苏特高压直流（7200 MW），并通过 3 个 500 kV 输电通道受电，如图 1 所示。

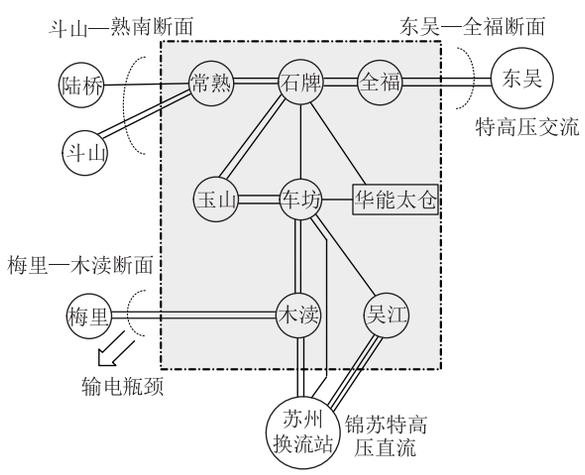


图 1　苏南 UPFC 工程接线

Fig.1　The connection diagram of Suzhou 500 kV power grid UPFC project

锦苏直流对苏州南部电网提供了有效的电力支撑，但由于其为水电直流，受季节性影响冬季枯水期送电大幅减少（仅 20%左右），因此苏州南部电网的电力受进随季节变化潮流分布影响较大，在直流小方式下梅里至木渎断面存在电力受进“卡脖子”的问题。经分析在苏州南部电网 500 kV 木渎—梅里安装 UPFC，可有效消除近期及远景冬季直流

小方式下的过载问题，有助于充分消纳锦苏直流输送功率，提升苏南地区电网的动态无功/电压支撑能力。

苏南 UPFC 站址位于木渎变电站，结构如图 2 所示，其并联换流器和串联换流器通过采用直流背靠背连接方式，并联换流器经过并联变压器接入木渎 500 kV 开关场，两组串联换流器经串联变压器串入木渎—梅里双回线路。并联侧具备动态无功支撑功能，串联侧可快速、稳定、灵活地调节线路潮流。

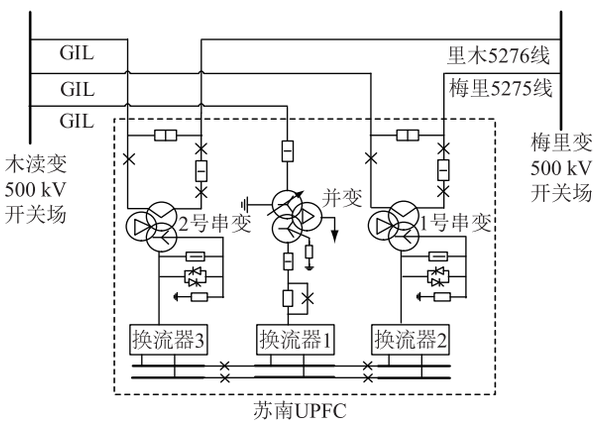


图 2　500 kV 苏南 UPFC 工程结构

Fig. 2　Structure of Southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project

苏南 500 kV UPFC 工程投运后主要作用包括一下几项：

（1）苏南电网冬季大负荷方式情况，锦苏直流小方式下，消除梅里木渎断面 $N-1$ 过负荷的问题；

（2）夏季大方式情况，锦苏直流大方式下发生双极闭锁时，通过提升地区电网供电能力，减小苏南地区切负荷量；

（3）通过 UPFC 无功电压控制，提高苏南地区电网电压恢复水平，有助于一定程度上减少锦苏直流发生换相失败次数。

根据近远期潮流控制需求，经计算分析确定苏南 UPFC 工程换流器容量取 2×250 MV·A（串联侧）及 1×250 MV·A（并联侧），其他关键设备及系统主要参数如表 1。

进一步，为实现上述苏南 500 kV UPFC 的作用，需配置一系列的控制保护策略。苏南 UPFC 工程根据 MMC 结构 UPFC 的特点，采用基于线路功率外环和换流器电流内环的双环协调控制策略，实现对线路有功功率和无功功率独立解耦控制，具备准确和快速的潮流调节能力。除了 UPFC 基本控制功能外，苏南 UPFC 工程配置了双回线 $N-1$ 控制、串联侧故障重启等控制功能，提升了电网故障时的支撑能力和穿越能力。

表 1　主要设备及参数

Tab.1　Main equipments and parameters

设备名称	参数名称	参数
换流器	数量/组	3
	拓扑结构	MMC
	桥臂子模块数量	112+11（冗余）
	额定容量/（MV·A）	250
	额定直流电压/kV	±90
串联变压器	数量/台	2
	结构	三相分体
	额定容量/（MV·A）	300/300/100
	电压变比/kV	43.5/105/10
	漏抗/p.u.	0.2/0.3/0.075
	接线形式	III/Yn/△11
并联变压器	数量/台	1
	结构	三相共体
	额定容量/（MV·A）	300/300/100
	电压变比/kV	505±8×1.25%/94/36
	漏抗/p.u.	0.1
	接线形式	YN0/YN/d11
晶闸管旁路开关 TBS	晶闸管级数	27 级串联
	额定电压/kV	105
	故障电流耐受能力	50 kA/100 ms
机械旁路开关	合闸时间/ms	≤40

2　UPFC 控制性能指标

UPFC 基本控制功能包括线路潮流控制和并联侧无功电压控制，对于控制要求包括稳态控制性能和动态控制性能。前者主要考察控制系统对于潮流的稳态控制能力，后者主要考察控制系统在电网动态过程中的控制性能[10-16]。

2.1　稳态误差指标

功率稳态误差包括线路有功功率、线路无功功率及 UPFC 并联侧无功功率的误差。电压误差测量是对 UPFC 并联侧接入点电压的误差测量。按下式计算获得稳态误差量 E：

$$E = \frac{M_C - M_R}{M_N} \times 100\% \tag{1}$$

式中：M_C为测量值；M_R为参考值；M_N为基准值。其中，参考值为对应测量量的设定参考值，M_N按如下原则确定：

（1）若测量量为并联侧电压，则基准值 M_N取并联侧接入点的额定电压；

（2）若测量量为并联侧无功功率，则取并联换流器额定功率；

（3）若测量量为线路有功功率或无功功率，则

按如下公式计算:

$$M_{\mathrm{N}} = \sqrt{3}\,U_{\mathrm{LN}}\min(I_{\mathrm{Llim}}, k_{\mathrm{T}}I_{\mathrm{SVN}}) \tag{2}$$

式中:U_{LN}为 UPFC 接入线路的额定电压;I_{Llim}为 UPFC 接入线路的热稳定限额;I_{SVN}为 UPFC 串联变压器阀侧额定电流值;k_{T}为串联变压器阀侧与网侧的电压变比。

(4) 若测量量为输电断面有功功率,则取为被控输电断面功率限额。

2.2　动态响应指标

系统动态响应指标包括响应时间、稳定时间、最大过冲、超调量,其中响应时间、最大过冲如图 3 所示。

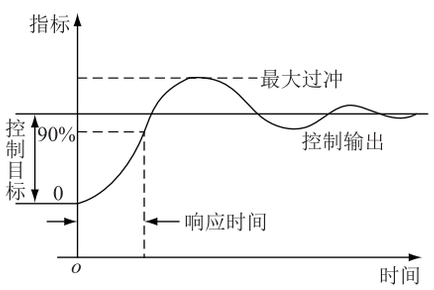


图 3　动态响应指标示意

Fig.3　Dynamic response indicator diagram

响应时间是指当输入阶跃控制信号后,输出电气量从 0 目标值达到 90% 目标值所用的时间,且期间没有产生过冲。超调量是指当输入阶跃控制信号后,输出电气量超出稳态值的最大过冲(最大偏移量)与阶跃量之比。

3　苏南 UPFC 控制功能

苏南 UPFC 工程以梅里—木渎双回线潮流和木渎母线电压为控制目标,工程根据 MMC 结构 UPFC 的特点,提出了基于线路功率外环和换流器电流内环的双环协调控制策略,解决了 UPFC 换流器功率与线路潮流之间没有直接耦合关系的应用难题,实现对线路有功功率和无功功率独立解耦控制。并创新地提出和实现了一系列附加控制策略,提升了电网异常或故障工况时 UPFC 工程的支撑能力和故障穿越能力。

3.1　基本控制

苏南 UPFC 工程通过内外双环控制将线路功率、并联侧无功指令转化为对换流器输出电压的控制指令,达到改善潮流、动态无功支撑的目的。

3.1.1　并联侧控制

苏南 UPFC 并联侧换流器控制方式为控制直流电压恒定,同时控制并联侧输出无功功率或交流电压。以无功控制为例,采用并联变压器阀侧电压 U_{V} 定相,进行 dq 分解,分别形成阀侧电压的 d 轴分量 $U_{\mathrm{V}d}$,q 轴分量 $U_{\mathrm{V}q}$以及阀侧电流的 d 轴分量 $i_{\mathrm{V}d}$,q 轴分量 $i_{\mathrm{V}q}$。并联侧换流器与电网交换有功功率 P_{V}和无功功率 Q_{V}可以表示为:

$$\begin{cases} P_{\mathrm{V}} = \dfrac{3}{2}(U_{\mathrm{V}d}i_{\mathrm{V}d} + U_{\mathrm{V}q}i_{\mathrm{V}q}) \\ Q_{\mathrm{V}} = \dfrac{3}{2}(U_{\mathrm{V}q}i_{\mathrm{V}d} - U_{\mathrm{V}d}i_{\mathrm{V}q}) \end{cases} \tag{3}$$

因此,根据并联侧有功功率参考值 $P_{\mathrm{V_ref}}$和无功功率 $Q_{\mathrm{V_ref}}$参考值(脚标"_ref"表示相应电气量的参考值,即控制目标,下文同),通过逆模型计算出并联侧阀侧电流 dq 轴分量参考值,如图 4 所示。

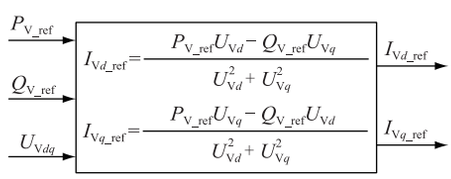


图 4　阀侧电流计算

Fig.4　Valve side current calculation

3.1.2　串联侧控制

苏南 UPFC 串联侧换流器通过控制串联变压器交流侧串入线路电压的幅值和相角来调节线路潮流达到指令值。线路有功和无功解耦控制,线路有功按指令值控制,线路无功可以选择按无功指令值控制,或者恒定功率因数控制。并根据需求,串联侧配置了限额控制模式,正常时串联换流器输出一个小的固定电压相量,线路功率随系统潮流波动,基本为自然潮流,当线路电流越限时进行限制防止线路过载。

串联侧换流器控制采用线路电压 U_{L}定相进行 dq 分解,分别形成线路电压的 d 轴分量 $U_{\mathrm{L}d}$,q 轴分量 $U_{\mathrm{L}q}$以及线路电流的 d 轴分量 $i_{\mathrm{L}d}$,q 轴分量 $i_{\mathrm{L}q}$。线路输送的有功功率 P_{L}和无功功率 Q_{L}可以表示为:

$$\begin{cases} P_{\mathrm{L}} = \dfrac{3}{2}(U_{\mathrm{L}d}i_{\mathrm{L}d} + U_{\mathrm{L}q}i_{\mathrm{L}q}) \\ Q_{\mathrm{L}} = \dfrac{3}{2}(U_{\mathrm{L}q}i_{\mathrm{L}d} - U_{\mathrm{L}d}i_{\mathrm{L}q}) \end{cases} \tag{4}$$

稳态外环控制采用开环-闭环复合控制策略,主要目标是保证外环线路有功、无功功率控制的性能。其中开环部分采用逆模型设计思路,根据线路有功功率和无功功率指令直接得到线路电流指令,以提高线路功率外环控制器的响应速度;闭环部分则引入线路有功功率和无功功率偏差调节器,以消除稳态误差。外环控制原理如图 5 所示,其中串联变压器阀侧电压、阀侧电流分别用 U_{v},i_{v}表示。

对于串并联侧 MMC 的控制器电流内环，采用控制精度高、动态响应速度快、能够快速跟踪电流变化的无差拍控制策略。

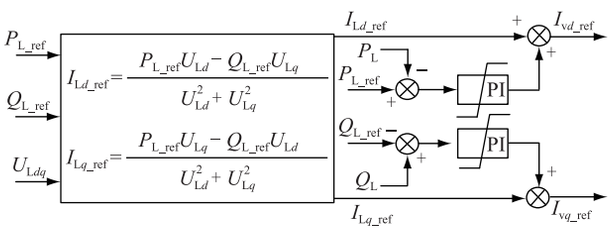


图 5　外环控制

Fig.5　Outer loop controller

3.2　双回线 *N*−1 控制

线路故障切除将引起电网潮流变化，可能导致其他线路过载，危害电网静态稳定。为解决这一问题，苏南 UPFC 工程配置了双回线 *N*−1 控制功能。

双回线控制方式下，梅里—木渎双回线任一条线路故障切除时，通过 UPFC 的双回线 *N*−1 控制功能，由另一条正常运行线路，转代双回线功率。并且，当双回线功率超过单回线过载能力时，UPFC 将自动调节单回线输送电流为运行范围上限。梅里—木渎双回线 *N*−1 故障时，通过双回线 *N*−1 控制功能，消除或减少了对电网潮流分布的影响。

双回线 *N*−1 控制功能通过双回线路协调控制实现，以线路 1 为主控线路时，其策略如图 6 所示。图中 P_{ref1}，P_{ref2}分别表示两回线路中线路 1 与线路 2 的参考值；P_{set1}，P_{set2}，P_{set_double}分别表示线路 1、线路 2、双回线的设定值；P_{set_1limit}表示线路 1 运行范围上限，P_2表示线路 2 实际功率。

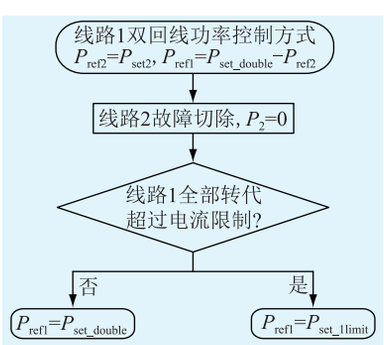


图 6　双回线协调控制策略

Fig.6　Double-circuit lines coordinated control strategy

3.3　串联侧故障穿越策略

UPFC 利用串联换流器交流侧产生幅值、相位可调的电压，通过串联变压器将这个电压串入线路实现改变线路两端电压的幅值与相位差，从而独立地控制输电线路有功功率和无功功率。在这一结构下，当电网发生故障或异常运行工况，产生的大电流将通过变压器直接耦合入 UPFC 串联侧换流器，威胁换流阀设备安全。因此交流电网故障时，可能出现将 UPFC 停运以保障设备安全的情况。

面对换流器固有的弱电流耐受能力，苏南 UPFC 工程配置了串联侧自动重启策略，故障时短时闭锁串联侧，故障恢复后 UPFC 自动重启，提升了 UPFC 的故障穿越能力。

影响 UPFC 工程串联侧运行的故障可分为 UPFC 本体故障和电网故障，电网故障包括 UPFC 所串入线路故障，串联变压器故障以及电网远端故障（除了所串入线路和变压器外的其他电网故障）。苏南 UPFC 工程某串联侧因过流短时隔离后，UPFC 切换至单回线 UPFC 方式或 STATCOM 方式运行，同时进入自动重启策略。

自动重启策略主要包含重启命令判别和重启执行判别两个模块。重启命令判别综合电网状态、保护动作和开关位置等多种信息，判断故障状态与故障区域，故障区域为线路故障和电网远端故障时，延时进入重启执行判别，否则将该串联侧被长久隔离并切换 UPFC 运行方式。重启执行判别主要检测两个部分，一是电网状态，包括线路运行状态以及近端电网电压水平等，保证故障已恢复或隔离，电网具备重启条件；二是检测 UPFC 并联换流器及直流线路运行状态，保证 UPFC 系统具备重启该串联侧的能力。若满足重启执行判别条件，即时执行该串联侧重启，否则将该串联侧被长久隔离。重启策略基本流程如图 7 所示。

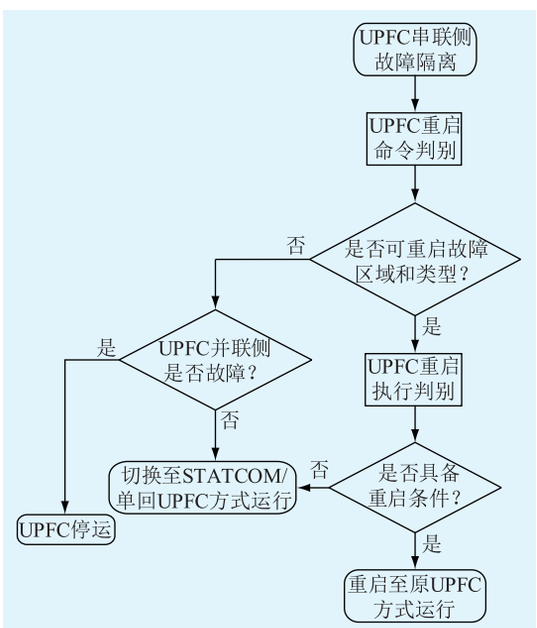


图 7　重启策略判别流程

Fig.7　Process of the restart strategy

4　试验验证

4.1　基本控制性能

4.1.1　稳态性能试验

对线路有功功率、线路无功功率、并联侧无功功率、并联侧电压分别设置控制指令,稳态后按式(1)计算每种控制下的稳态误差,典型试验结果如表 2 所示。由试验数据可见,苏南 UPFC 工程的功率类稳态控制误差不超过 1%,并联交流电压控制误差不超过 0.1%。

表 2　苏南 UPFC 工程稳态控制误差

Tab.2　Steady state control error of Southern Suzhou UPFC project

试验	稳态误差/%
双回线有功控制	0.23
双回线无功控制	0.28
并联交流系统电压	0.08
并联侧无功功率	0.6

4.1.2　动态性能试验

对线路有功功率、线路无功功率、并联侧无功功率分别开展不同指令下的动态阶跃试验,考验控制器的快速响应特性,结果如表 3。可见,不同控制目标动态控制特性差别较大。其中双回线有功、无功阶跃超调量在 30%内、上升时间在 40 ms 内,并联侧无功阶跃超调量在 10%内、上升时间在 10 ms 内。

表 3　双回线功率稳态控制波形

Tab.3　Wareform of double loop power steady state control

试验	上升时间/ms	超调量/%
双回线有功 50 MW 阶跃	16.6	24
双回线有功 100 MW 阶跃	16.4	27
双回线无功 20 Mvar 阶跃	30	11
双回线无功 50 Mvar 阶跃	31	12
50 Mvar 阶跃无功指令	6.69	4.7
100 Mvar 阶跃无功指令	6.69	3.9

4.2　附加控制功能

4.2.1　双回线路 $N-1$ 控制试验

苏南 UPFC 工程以双线 UPFC 运行方式运行,双回线功率均为−350 MW。设置线路 2 的电流限制为 760 A,拉开线路 1 模拟线路停运。线路 1 停运后,73 ms 时线路 2 开始功率转代,约 170 m 线路 2 完成功率专代,调节后线路 2 电流受限保持 760 A,输送功率为−656 MW,过程录波如图 8 和图 9 所示。

4.2.2　UPFC 故障重启试验

工程系统试验中,通过模拟线路发生单相瞬时

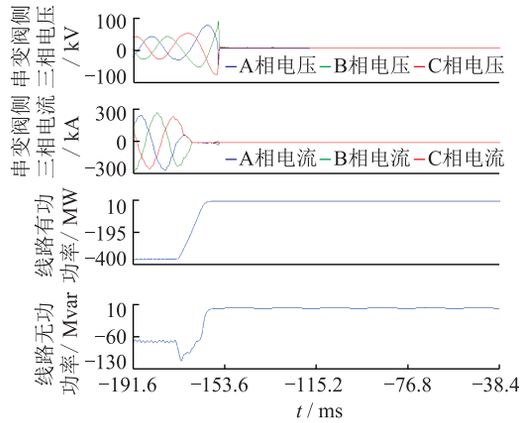


图 8　线路 1 停运波形

Fig.8　Waveform of line 1 outage

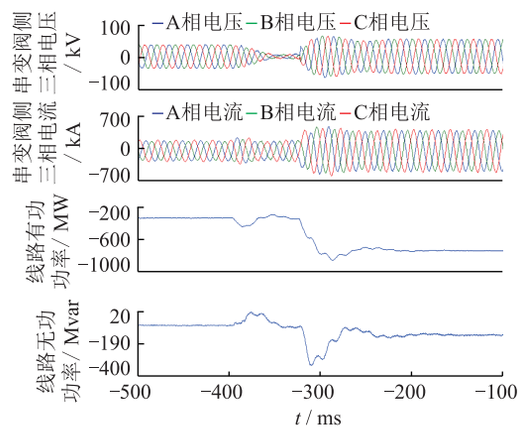


图 9　线路 2 功率转代波形

Fig.9　Waveform of line 2 for power transfer

性故障引起串联 2 换流器过流闭锁,检查串联侧自动重启策略。录波如图 10—11 所示,试验结果表明故障后,串联侧 2 短时闭锁,并经过约 5.6 s 后自动执行重启成功,期间串联侧 1 保持正常运行。

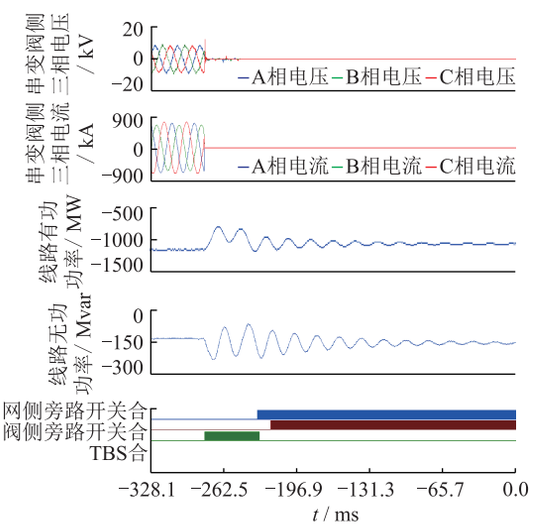


图 10　串联侧 2 被隔离波形

Fig.10　Being isolated waveform of series connect unit 2

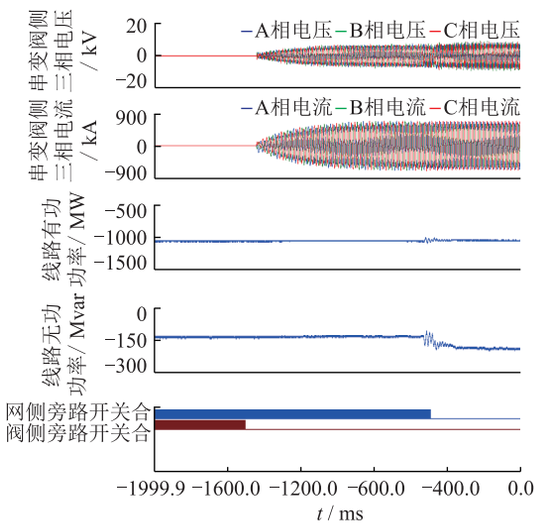


图 11　串联侧 2 重启波形

Fig.11　Restarting waveform of series connect unit 2

5　结论

本文在梳理 UPFC 基本控制性能指标和功能要求的基础上，针对苏南 UPFC 工程应用需求，研究了其控制功能实现方式，并对工程实际控制性能展开测试和分析，主要结论如下：

（1）苏南 UPFC 工程中，对线路功率、并联侧无功功率控制误差可保持在 1%以下，并联侧电压稳态误差可保持在 0.1%以下。不同控制目标动态控制特性别差较大。对线路无功功率展开 50 Mvar 以内的阶跃试验，对线路有功功率、并联侧无功展开 100 MW 或 100 Mvar 以内的阶跃试验。其中双回线有功、无功阶跃超调量在 30%以内，上升时间在 40 ms 以内；并联侧无功阶跃超调量在 10%以内，上升时间在 10 ms 以内。

（2）苏南 UPFC 工程中，创新地提出和实现了一系列附加控制策略，提升了电网故障下 UPFC 工程的运行能力。其配置了双回线 $N-1$ 控制功能，梅木—木渎单回线路故障时，实现了另一回线路自动功率转代，提升了 $N-1$ 故障下电网稳定性。该工程配置了串联侧故障重启功能，克服了串联侧接入结构下，电力电子设备固有的弱电流耐受能力对 UPFC 工程运行能力的限制，提升了 UPFC 故障穿越能力。

参考文献：

[1] 李　岩，罗　雨，许树楷，等. 柔性直流输电技术：应用、进步与期望[J]. 南方电网技术，2015，9(1)：7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.

[2] GYUGYI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.

[3] RENZ B A, KERI A, MEHRABAN A S, et al. AEP unified power flow controller performance [J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 1999, 14(4): 1374-1381.

[4] SCHAUDER C, STACEY E, LUND M, et al. AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the ± 160 MV·A STATCOM (phase I)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 13(4): 1530-1535.

[5] CHANG B H, CHOO J B, IM S J, et al. Study of operational strategies of UPFC in KEPCO transmission system[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES. IEEE, 2005: 1-6.

[6] 陈　刚，李　鹏，袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析 [J]. 电力系统自动化 2016，40(7)：121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonicanalysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.

[7] 宋晓燕. 统一潮流控制器(UPFC)在湖南电网中的应用研究[D]. 北京：华北电力大学，2012.
SONG Xiaoyan. Application of unified power flow controller (UPFC) in Hunan Power Grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[8] 庄良文，张彦兵，荆雪记，等. 基于 RTDS 仿真的 MMC_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(16)：56-62.
ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current strategy based on RTDS [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-62.

[9] 陈业飞，李林川，张　芳，等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(2)：69-74.
CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.

[10] 李骅文. 美国 INEZ 变电站统一潮流控制器简介[J]. 电网技术，2002，26(8)：84-87.
LI Pianwen. Abrief introduction to principle of UPFC in stalled in INEZ substation of AEP system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 84-87.

[11] KIMS Y, YOONJ S, CHANG B H, et al. The operation experience of KEPCO UPFC [C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, 2005: 2502- 2505.

[12] 陈东华，谢少军，周　波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报，2005，25(20)：62-67.
CHEN Donghua, XIE Shaojun, ZHOU Bo. An improved syn-

chronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67.

[13] 孙　驰,魏光辉,毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):43-48.
SUN Chi,WEI Guanghui,BI Zengjun. Detction for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based on synchronous reference frame transformation [J]. Proceedings of the CSEE,2004,23(12): 43-48.

[14] 林金娇,李　鹏,孔祥平,等. 南京西环网 UPFC 保护系统及配合策略[J]. 江苏电机工程,2015,36(6):56-60.
LIN Jinjiao,LI Peng,KONG Xiangping,et al. The UPFC protection system configuration and action strategy in Nanjing western power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2015,36(6):56-60.

[15] 李　岩,龚雁峰,姜　斌. 一种基于方向行波的多端 VSC-HVDC 系统保护策略[J]. 电力工程技术,2017,36(1): 71-74.
LI Yan,GONG Yanfeng,JIANG Bin. A protection scheme for multiterminal VSC-HVDC system based on direction traveling waves[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1): 71-74.

[16] 徐　政,张哲任,刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术,2017,36(1): 54-59.
XU Zheng,ZHANG Zheren,LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1): 54-59.

作者简介:



李　群

李　群(1967—),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统运行优化、柔性交流输电技术、电能质量等研究工作;

林金娇(1988—),女,硕士,从事柔性输电控制保护技术、特高压输电控制保护技术等研究工作;

李　鹏(1982—),男,博士,高级工程师,从事电力系统继电保护、直流控保技术等研究工作。

Control Function Research and Performance Test of Southern Suzhou 500 kV Power Grid UPFC Project

LI Qun, LIN Jinjiao, LI Peng

(State Grid Substation Intelligent Equipment Testing Technology Key Laboratory

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to solve the problems of power supply capacity improvement and UHVDC power dissipation in Southern Suzhou 500 kV power grid, the first unified power flow controller (UPFC) project applied in 500 kV power gird is put into operation. Based on the application of Southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project and the analysis of power flow regulation demand, this paper sorts out the key control performance indexes and control function requirements of UPFC system. Finally, through system commissioning, the control functions and performances of the UPFC are tested, it mainly includes UPFC basic control performance indexes such as steady-state control precision and dynamic response, $N-1$ emergency power control function, UPFC locking and automatic restarting control function, which are used to test control ability and operation effect of Southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project, it accumulates important practice experience and data for the construction of the follow-up engineering and standard establishment.

Key words: unified power flow controller (UPFC); Southern Suzhou 500 kV power grid UPFC project; control system; system commissioning

(编辑　方　晶)