

· 专论与综述 ·

统一潮流控制器技术现状及应用分析

陈刚¹, 刘建坤², 李群²

(1. 江苏省电力公司, 江苏南京 210024; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)是功能最全面、技术最复杂的柔性交流输电技术,文中在介绍UPFC的技术原理、运行方式等基础上,重点分析了UPFC的换流器技术发展,并介绍了国外UPFC的应用情况和使用背景。文中对南京西环网UPFC示范工程的必要性进行了研究,并详细介绍了工程的接入系统、UPFC拓扑结构、换流器结构、串并联侧接入和直流场方案等,并对工程的综合效益进行了分析,结果表明UPFC技术对于解决南京西环网潮流控制问题具有十分重要的作用。

关键词:柔性交流输电;统一潮流控制器;模块化多电平换流器;潮流控制;稳定性

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)01-0001-06

随着电网规模的扩大,区域内发电和负荷分布不均衡、输变电设备潮流分布不均匀问题日益突出,设备重载和轻载问题并存,而受制于重载设备的承受能力、电网供电能力难以得到充分利用。此外,由于城市规划的限制,线路改造和电网扩建难度日益增大^[1,2]。因此,在现有网架的基础上如何提高电网的输电能力、改善电网的潮流分布、保证电网的安全运行是当前亟待解决的问题。统一潮流控制器(UPFC)是目前为止功能最全面、控制范围最广且特性最优越的柔性交流输电装置^[3-5]。UPFC通过调节串联侧和并联侧换流器输出电压的幅值和相角,可以独立或同时对受控母线的电压幅值、受控线路的有功和无功功率进行快速控制^[6],为改善电网的潮流分布、提高线路输电能力提供了新思路和新技术。目前,国内还未有UPFC的实际工程投产,其研究主要集中在仿真建模、控制策略等方面,其中电源型模型^[7]详细地阐述了UPFC的基本原理,功率注入模型^[8]在不改变原有电网节点导纳矩阵的基础上嵌入UPFC进行潮流计算,动态模型^[9]结合不同控制器有效地对系统的潮流、节点电压和暂态稳定控制进行分析^[10-12]。但是,大多数研究仅限于理论层面,针对实际电网工程中的应用研究还较少。

文中对UPFC的技术原理和发展历程进行了概括总结,阐述了UPFC的运行方式,介绍了模块化多电平换流器(MMC)技术的结构原理及特点,讨论了UPFC的作用及其在国外实际电网中的应用现状。研究了在南京西环网加装UPFC的必要性,并提出了南京西环网UPFC工程的接入系统、UPFC拓扑结构、换流器结构、串并联侧接入和直流场的详细方案,方案对于UPFC工程的示范推广具有重要参考价值。

1 UPFC 技术及发展

1.1 统一潮流控制器技术原理

UPFC的典型结构如图1所示,它由2个共用直

流侧的电压源换流器(VSC)组成^[13]。VSC1通过控制直流电压恒定来维持UPFC内部有功功率的平衡,为串联部分的有功功率提供了通道,同时向系统提供无功功率补偿,以便支撑和调整节点1的电压。VSC2可以在其能力的范围内调节节点2的电压幅值和相角,从而控制了节点2与系统受端之间的有功功率、无功功率^[7,14]。

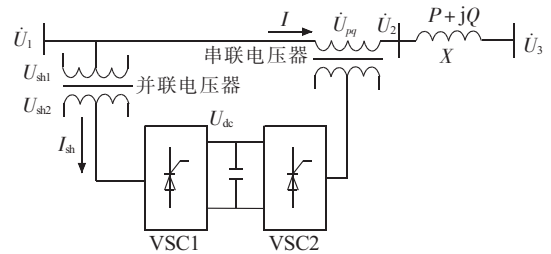


图1 UPFC的典型结构

在UPFC的众多稳态模型中,电源型模型最能够详细解释UPFC的基本原理,该模型的等效电路如图2所示。加装UPFC后,线路潮流为:

$$\begin{aligned} S_{ij} = & \dot{V}_i \left[-I_1 + \frac{\dot{V}_i + \dot{V}_s - \dot{V}_j}{r_{ij} + jx_{ij}} + (\dot{V}_i + \dot{V}_j) \left(j\frac{B}{2} \right) \right]^* = \\ & \dot{V}_i \left[\frac{\dot{V}_i - \dot{V}_j}{r_{ij} + jx_{ij}} + \dot{V}_i \left(j\frac{B}{2} \right) \right]^* + \dot{V}_i \left[-I_1 + \frac{\dot{V}_s}{r_{ij} + jx_{ij}} + \dot{V}_i \left(j\frac{B}{2} \right) \right]^* = \\ & \dot{S}_{ij(L)} + \dot{S}_{ij(UPFC)} \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,通过调节串联侧等效电压源的幅值和相角,能够改变注入节点*i*和节点*j*的附加功率,从而改变线路潮流分布,达到调节功率的目的。

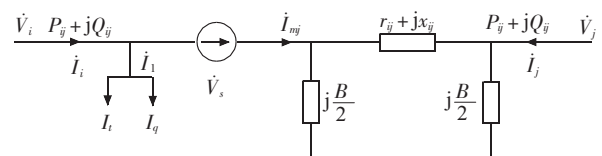


图2 串联电压源和并联电流源的UPFC等效电路

1.2 UPFC的运行方式

如图1所示,UPFC的串联电压源换流器VSC2

的结构等效于静止同步串联补偿器(SSSC)。其主要运行方式^[15]有:(1)恒阻抗模式:VSC2注入的可控电压源的幅值与线路电流成一固定比值,相位可超前或滞后线路电流 90° ,其相应补偿电抗为容性或感性;(2)恒电压模式:VSC2的注入可控电压源幅值固定,补偿电抗随着线路电流的变化而变化,相位同样可超前或滞后线路电流 90° ;(3)恒功率模式:VSC2的注入可控电压源的幅值与相位同时在不断变化,保证线路潮流固定在某一参考值。

并联电压源换流器VSC1的结构等效于一台静止同步补偿器(STATCOM)。其主要运行方式^[16]有:(1)恒无功模式:VSC1的注入可控电流源的幅值与相位不断变化,保持恒定无功功率注入;(2)恒电压模式:VSC1通过调节可控电流源的幅值和相位,无功功率可控,保持电压恒定。

将SSSC和STATCOM运行方式进行组合可以得到UPFC运行方式,其综合了SSSC和STATCOM运行方式的优点,可独立控制线路有功、线路无功和节点电压幅值。值得指出的是,由于无法实现有功交换,独立的SSSC装置只能为所串入的线路提供同线路电流相位垂直的串联电压,从而保证其直流侧电压恒定,而UPFC从结构上作为SSSC和STATCOM的组合,将STATCOM通过直流侧与SSSC耦合后接入电网,可为串联侧提供有功支撑,实现串联侧和并联侧的有功交换,从而可以任意调节串联侧电压与线路电流之间的相角差,因此可实现比单独SSSC更为强大的潮流控制能力。

1.3 换流器技术

VSC是UPFC最为核心的部件,具有多种拓扑形式,常见的有两电平、三电平及多电平^[17,18]。目前实际工程中广泛采用的VSC多为两电平拓扑结构,图3给出了其拓扑示意图。该拓扑的优点是结构相对简单,通常采用脉宽调制技术(PWM),控制相对容易;缺点是过高开关频率导致较大损耗、低电压等级以及串联IGBT引起的动静态均压和电磁干扰等,这些缺点限制了其在实际工程中的进一步应用。

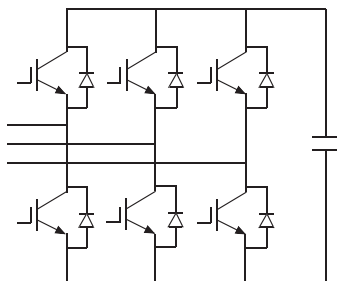


图3 两电平VSC拓扑结构

三电平及多电平VSC拓扑主要有箝位型和级联型。根据箝位器件的不同,箝位型拓扑可分为二极管

箝位型、飞跨电容型^[19,20]。图4(a)和图4(b)分别为二极管箝位型三电平和飞跨电容型三电平拓扑示意图。相比于两电平VSC,采用箝位型多电平结构可以有效地提升换流器容量,同时减小可关断器件的电压应力,但该种拓扑存在直流侧均压问题且难以模块化生产的困难。

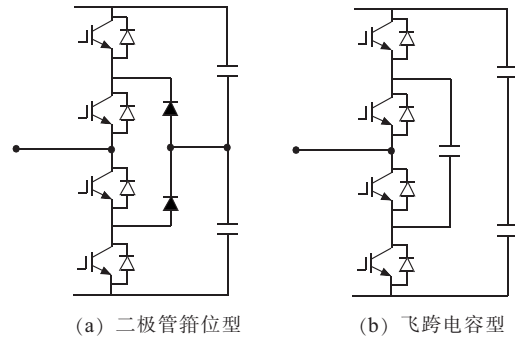


图4 三电平VSC拓扑结构

MMC是由德国慕尼黑联邦国防军大学的学者Rainer Marquardt在2001年提出^[21],该换流器采用模块化设计,通过调整子模块的串联个数实现电压及功率等级的灵活变化,且可以扩展到任意电平输出。

三相MMC的拓扑结构如图5所示,该换流器采用三相结构,每相分为上下2个桥臂,每个桥臂由若干个结构、参数相同的子模块(SM)与电抗器 L 串联构成^[22]。单个SM的结构由上下2个IGBT及其反向并联二极管和直流电容组成。稳态运行时,单个SM有投入和切除2种状态,S1导通S2关断时为投入状态,SM输出电压为电容电压 U_c ;S1关断S2导通时为切除状态,SM输出电压为0。通过调整相单元上下桥臂SM处于投入状态的个数即可合成所期望的电压,该输出电压是所有SM输出电平的代数和,此外需要保证任何时刻每个相单元中上下桥臂投入的SM个数之和为定值以维持直流电压的恒定^[23]。

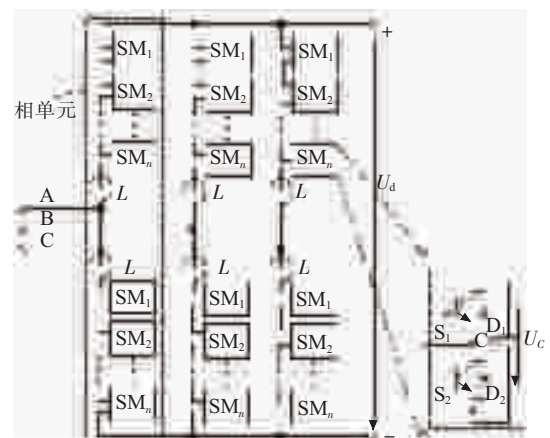


图5 MMC拓扑结构

MMC的调制技术对MMC的工作性能产生直接影响。目前常用的MMC的调制技术主要有:最近电平

逼近调制(NLM)、载波移相脉宽调制(CSP-SPWM)、空间矢量脉宽调制(SVPWM)和特定次谐波消除调制方式(SHEPWM)^[24-27]。其中,NLM调制采用阶梯波逼近正弦波,原理简单,动态响应速度快,易于硬件实现,缺点是在换流器输出电平数较少或调制系数较低时,波形质量差,输出的谐波含量增加;CSP-SPWM在较低的器件开关频率下可以实现较高的等效开关频率,采用CSP-SPWM时MMC各功率单元的开关频率相同,各单元能量分布均衡,且谐波特性良好,但实现方式较为复杂;SVPWM在电平数较高时受到限制;SHEPWM在计算开关点时需要求解非线性超越方程,计算复杂,动态特性较差^[23]。因此,在实际工程中,NLM和CSP-SPWM的应用较为广泛。

与传统的两电平、三电平VSC相比,MMC拓扑有着显著优势:MMC的输出波形十分平滑,几乎接近于标准正弦电压,因此MMC可大大减少滤波器容量甚至不需要装设滤波装置,从而节省了系统谐波抑制设备的投资;MMC开关器件的开关频率低,开关损耗也相应减少;MMC结构的高度模块化,可以满足不同的电压等级和功率等级的需要,能够实现任意电平的输出,方便容量升级,利于集成化、降低成本和提高系统可靠性^[24-29]。

2 国外 UPFC 工程应用情况

国外已有3座投入实际运行的UPFC工程。主要包括美国INEZ变电站的UPFC工程,纽约州的Marcy 345 kV变电站的CSC工程以及韩国Kangjin变电站的UPFC工程,3个工程的具体应用情况如下所述。

2.1 美国 INEZ 变电站 UPFC 工程

世界上首台UPFC于1998年投运,由AEP、EPRI和西屋电气公司共同开发,安装在美国AEP系统的INZE地区的765/138 kV电网^[30,31]。整个UPFC由2台完全相同、额定容量为160 MV·A的换流器组成。为了充分利用2个换流器,用2台相同的并联变压器和1台串联变压器通过母线和隔离开关与换流器连接。通过开关切投可实现不同运行方式,2个换流器可以以UPFC模式工作,或者断开换流器之间直流侧开关后可以以STATCOM+SSSC或者2个STATCOM的方式运行。解决了向INZE地区供电的几条重负荷的长输电线路损大且母线电压低的问题^[32]。

2.2 纽约 Marcy 变电站可转换式静止补偿器(CSC)工程

2004年,纽约州的Marcy 345 kV变电站安装了CSC^[33,34],其内部包含了1台完整UPFC的结构。整个设备由2台±100 MV·A的VSC换流器、1个200

MV·A的并联变压器和2个100 MV·A的串联变压器组成。并联变压器与Marcy变电站母线相连,2个串联变压器分别串接于变电站的两回出线上。通过开关的转换可以实现4种运行方式(SATCOM、SSSC、UPFC、IPFC)的转换。该项目的投运在不增加新的线路的情况下解决了Utica—Albany联络线输送的电力接近线路传输极限的问题,提高了系统的传输容量和线路电压的稳定性、防止意外事故的发生,同时使得电网的运行更加经济。

2.3 韩国 Kangjin 地区 UPFC 工程

为解决韩国Kangjin地区由于附近的发电厂出力下降及附近输电线路断开导致变电站主变过负荷的问题,2003年在Kangjin地区安装了1台±80 MV·A的UPFC^[35]。该台UPFC由1组2个并联换流器和1组2个串联换流器组成,换流器都为40 MV·A,采用4重化三相三电平结构,同时用带中间抽头的变压器连接各组换流器来降低 $6n+1$ 次谐波。在串联变压器和换流器之间接有晶体管旁路开关电路,系统发生故障时断开旁路开关电路,使UPFC退出运行,防止过电流损坏换流器。

3 南京西环网 UPFC 示范工程

3.1 南京西环网 UPFC 工程必要性分析

南京西环网为南京主城220 kV环网西部,主要供电范围为南京鼓楼区、建邺区以及栖霞新港地区、雨花经济开发区,是南京城网的主要负荷中心。由于电网结构及电源、负荷分布特点,南京西环网存在较严重的潮流分布不均情况,其中500 kV龙王山变向西环网的220 kV输电通道潮流偏重,尤其是西环网内220 kV晓庄南送下关、中央门断面潮流过重情况尤为突出,而500 kV东善桥变向西环网的220 kV输电通道较轻,影响了南京西环网的整体供电能力和安全可靠水平。南京西环网2015年底电网结构如图6所示。

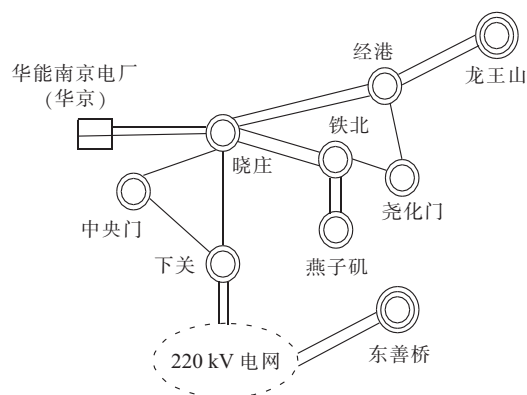


图6 西环网结构图(2015年底)

2014、2015年高峰方式下,晓庄—下关/晓庄—中央门断面潮流重载,最大潮流已接近800 MW,超过

650 MW 稳定限额,需要采用安自装置切除华能南京机组来满足 $N-1$;2016 至 2019 年,随着新建 500 kV 变电站的投运,晓庄南送断面潮流降低,但仍无法满足 $N-1$ 校核,需要保留安自装置;2020 年及以后,为满足该区域电网供电,500 kV 秋藤变投运,晓庄南送断面潮流随之减轻,但秋藤变配套送出的绿博园—码头线路潮流过重,仍难以满足 $N-1$ 校核。

为解决南京西环网潮流分布不均和供电能力受限的问题,可考虑的常规方案如下:

第一类方案:新建线路通道或对原有通道实施增容改造,可将华能南京电厂至晓庄单回线路开断环入码头变(方案 1),或晓庄—下关/晓庄—中央门—下关线路更换倍容量导线(方案 2)。经详细论证,方案 1 需建设 2×9 km 的 220 kV 电缆,投资规模巨大、建设难度大,且华能南京机组关停后作用降低;方案 2 政策处理难度大,且改造时的停电安排难以实施。

第二类方案:通过调整分区结构(开断西环网)解决潮流不均供电能力受限的问题。该类方案安全风险大,存在 400 MW 城区负荷短时停电的可能。

对此,根据详细研究分析,考虑在西环网装设 UPFC 来均衡西环网各输电通道潮流,提升西环网的供电能力。

3.2 UPFC 的系统方案

3.2.1 UPFC 接入方案和容量

根据网架拓扑和潮流分析,UPFC 最适合的安装地点为晓庄变,但由于场地限制,该工程考虑在晓庄变附近的铁北开关站装设 UPFC 装置,将晓庄—经港双线开断环入铁北站,并将原铁北—晓庄线路作为备用线路运行。具体安装方案见图 7。

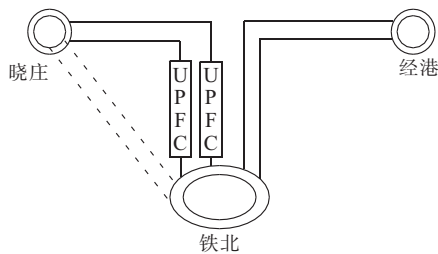


图 7 UPFC 的安装方案

根据近期和远景年对 UPFC 潮流控制要求的计算分析,在各种可能运行方式下,对 UPFC 的容量要求如表 1 所示。远景年(2020 年)西环网结构如图 8 所示。

根据计算结果,UPFC 串联侧最大容量需求为 $59.32 \text{ MV} \cdot \text{A}$,对此确定配置串联侧换流器 2 组,各 $60 \text{ MV} \cdot \text{A}$;此外,由于南京西环网内电缆较多,无功调节需求较大,且考虑串联侧换流器同并联侧换流器可互为备用因素,并联侧配置换流器 1 组,容量同为 $60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。工程计划 2015 年底投运。

3.2.2 UPFC 拓扑结构

表 1 UPFC 容量需求

年份	UPFC 容量选择因素	串联侧额定容量 / ($\text{MV} \cdot \text{A}$)
2016 年	晓庄断面 $N-1$ 后,控制另一回线路不过载	26.81
	秦淮—滨南线路 $N-1$ 后,控制另一回线路不过载	20.21
2017 年	晓庄南送断面 $N-1$ 后,控制另一回线不过载	28.85
2017 年	秦淮—滨南 $N-1$ 后,控制另一回线不过载	59.32
2025 年	绿博园—码头 $N-1$ 后,控制另一回线不过载	49.84

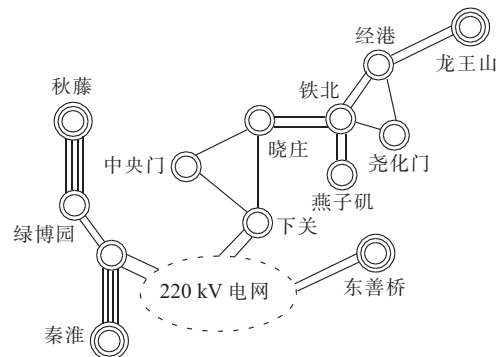


图 8 西环网结构图(2020 年)

如图 9 所示,3 个换流器均通过隔离刀闸连接至串联变压器,再通过 2 个串联变压器分别接入铁北—晓庄 220 kV 双回线路;同时,3 个换流器均通过隔离刀闸连接至 1 个启动电阻,再通过 2 个并联侧变压器分别接入站内 35 kV 母线的 2 个分段;3 个换流器采用背靠背的连接方式,通过隔离刀闸连接至直流公共母线上。采用此结构后,通过串联侧和并联侧刀闸的开断组合,3 个换流器可组合成双线 UPFC、单线 UPFC、双线 SSSC、单线 SSSC 及 STATCOM 等运行方式。

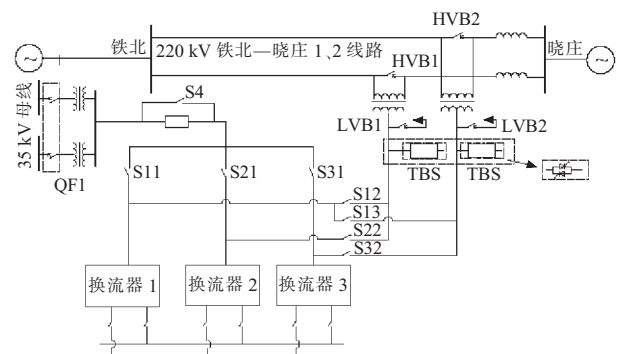


图 9 南京 UPFC 工程系统主接线

3.2.3 换流器结构

工程采用半桥式 MMC,每相上、下桥臂各 26 个子模块,并配置 2 个冗余子模块,每个子模块可以独立控制,交流电压由每相中 2 个桥臂的子模块旁路比例来控制。每个桥臂装设桥臂电抗器,用于抑制阀侧和直流侧发生短路故障时的桥臂电流上升速度。

3.2.4 串联换流器接入系统方案

串联侧共设置 2 台三绕组(含平衡线圈)串联联结变压器,串联变压器使用 III/Yn/△接法,Y 侧中性点通过高阻接地,△侧为平衡绕组。串联联结变压器高压侧采用 III 接线组别实现分相串入晓庄—经港双回 220 kV 线路中,变压器低压侧绕组连接换流器,该侧为 Y 接法,中性点经高阻接地以保证 SSSC 模式有可靠的接地点;为了减小线路故障后阀侧的故障电压,提供线路 3N 次谐波的通路,改变变压器零序阻抗,串联变压器采用带平衡绕组的结构。经计算,配置串联变压器的容量为 70/70/25 MV·A,变压器各侧的电压为 26.5/20.8/10 kV。

3.2.5 并联换流器接入系统方案

并联换流器经过 2 组互为备用的三相双绕组并联联结变压器分别接入 35 kV 母线的 2 个分段上,由于铁北开关站无 220 kV 变压器,而燕子矶变同铁北开关站为一址两站,因此方案中将 UPFC 并联侧接入燕子矶变 35 kV 母线。根据 UPFC 正常工作需要,为换流阀和直流极提供参考地电位,换流器侧需要配置接地点,同时为防止换流器侧谐波电流注入 35 kV 系统,并联变压器采用 DYn 接法,星侧中性点经高阻接地。经计算,配置并联变压器容量为 60 MV·A,变压器各侧电压为 $35 \pm 2 \times 2.5\% / 20.8$ kV。

3.2.6 直流场方案

南京西环网 UPFC 工程直流场采用三端背靠背的连接方式,3 个换流器布置在 1 个阀厅,直流场区主接线采用双极直流接线,直流电压等级为 ± 20 kV,采用户内直流场布置。UPFC 正常工作时,并联侧换流器控制直流电压,为串联侧换流器控制线路潮流提供所需要的有功功率,直流系统功率主要取决于串联侧换流器与线路交流的有功功率。经计算,配置直流系统容量为 40 MW。

3.3 UPFC 工程综合效益分析

3.3.1 UPFC 近期对电网作用分析

2015 年底加装 UPFC 装置之后,UPFC 可控制晓庄南送断面潮流,使其满足 N-1 校核。经计算,可使南京西环网的供电能力由 2500~3200 MW(考虑安自切机)提高到 3500 MW,供电能力提升 300~1000 MW;可以为南京城区电网提供 ± 60 MVar 的动态无功调节能力。

3.3.2 UPFC 远期对电网适应性分析

2020 年及以后,如图 8 所示,南京电网将投运 500 kV 秋藤变向西环网供电,在一定程度上减缓了西环网北部 220 kV 送电断面的潮流,但由于负荷的增加,绿博园送出断面潮流仍无法满足 N-1 校核,仍需通过 UPFC 的潮流调节能力,优化向西环网供电主要输电

断面的潮流分布。经计算,UPFC 通过使晓庄南送断面提高 300 MW,优化 500 kV 秦淮、秋藤送出潮流分布,可解决秋藤变投运后 220 kV 绿博园—码头线路 N-1 过载问题,并使得西环网供电能力由 3100 MW 提高到 3600 MW。UPFC 对西环网供电能力提升作用可参见表 2。

表 2 UPFC 对西环网供电能力提升一览表 MW

项目	2016—2019 年	2020—2025 年
供电能力(不采取措施)	2500	3100
供电能力(考虑安自切机)	3200	—
供电能力(装设 UPFC)	3500	3600
提升	300~1000	500

3.3.3 UPFC 经济社会效益分析

经济效益方面,通过装设 UPFC,由于其对南京西环网供电能力的提升作用,可使得秋藤扩建及配套送出工程推迟至少 2 年,节约投资约 1.7 亿元以上,秋藤建成后,通过 UPFC 的调节作用,每年可增供电量约 25 亿 kW·h,每年增收利润约 5000 万元。

社会效益方面,工程可为国内高度城市化地区电网采用智能输电技术提升供电能力,破解电网建设难题起到示范作用;此外,工程可为将来 500 kV 电网应用 UPFC 积累运行经验,并可为在更高电压等级电网应用,提高跨省、跨区电网间潮流控制水平,增强我国交直流混联大电网输电能力提供新的技术手段。

4 结束语

作为功能强大、特性优越的 FACTS 装置,UPFC 综合了多种灵活控制手段,可以控制线路阻抗、电压和相角,同时能够调节输电线路的有功和无功潮流,为解决目前电网中潮流分布不均、无功动态调节能力不足等问题提供了新的解决手段。

相比国外已应用的 UPFC 装置,南京西环网 UPFC 工程是在世界范围内首个使用 MMC 技术的 UPFC 工程,是新开发的功能更强大、配置更灵活的 FACTS 装置,其应用对满足电网对潮流优化、电压支撑等多方面需求,提高系统的可控性、稳定性和灵活性具有重要意义^[36]。文中分析了南京西环网 UPFC 工程的应用必要性,并提出了 UPFC 工程的接入系统、整体拓扑结构、换流器结构、串并联侧和直流场的详细方案,工程方案具有极高的科技示范作用和巨大的推广价值,也为更高电压等级电网的工程应用奠定基础。

参考文献:

- [1] 童强. 含 FACTS 元件的电力系统潮流计算模型与算法的研究[D]. 长沙:湖南大学,2005.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [3] POVH D, WEINHOLD M. Basic Control of Unified Power Flow

- Controller. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1734-1739.
- [4] 唐爱红,朱鹏程,程时杰,等.统一潮流调节器实验装置的研究[J].电工技术学报,2006,21(6):122-126.
- [5] GYUGYI L, SCHSTRUDER C D, EDRIS A. The Unified Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [6] 刘前进,宋永华. UPFC 潮流控制与优化的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(18): 23-26.
- [7] GYUGYI L. Unified Power-flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems[J]. IEE Proceedings-C, 1992, 139(4): 323-333.
- [8] GOTHAM D J, HEYDT G T. Power Flow Control and Power Flow Studies for System with FACTS Devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 12(1): 60-65.
- [9] NABAVI-NIAKI A, IRAVANI M R. Steady State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller(UPFC) for Power System Studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1937-1943.
- [10] FANG D Z, FANG Z, WANG H F. Application and the Injection Modelling Approach to Power Flow Analysis for Systems with Unified Power Flow Controller[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2001, 22(23): 421-425.
- [11] 章良栋,岑文辉,刘为. UPFC 的模型及控制器研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(1): 36-39.
- [12] WANG H F. Application of Modeling UPFC into Multi-machine Power Systems[J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1999, 145(3): 306-312.
- [13] BIAN J, RAMEY D G, NELSON R J, et al. A Study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1385-1391.
- [14] GYUGYI L. Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-state Synchronous[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 904-911.
- [15] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [16] 谢小荣,姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [17] RODRIGUEZ J, LAIJ S, PPENGF Z. Multilevel Inverters: a Survey of Topologies, Controls, and Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [18] 王小峰,何湘宁,邓焰. 载波交叠特性 PWM 方法在飞跨电容多电平逆变器中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 98-102.
- [19] 刘军娜,赵成勇,李广凯. 二极管箝位式三电平 VSC 损耗分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 96-99.
- [20] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.
- [21] MARQUARDT R. Stromrichterschaltungen mit Verteilten Ergieisspeichern: German, DE10103031A1[P]. 2001-01-24.
- [22] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
- [23] 赵昕,赵成勇,李广凯,等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
- [24] 管敏渊,徐政,潘伟勇,等. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1327-1332.
- [25] 王晓鹏,杨晓峰,范文宝,等. 模块组合多电平变换器的脉冲调制方案对比[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 28-33.
- [26] 李强,贺之渊,汤广福. 新型模块化多电平换流器空间矢量脉宽调制方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 75-79, 123.
- [27] 周明磊,游小杰,王琛琛,等. 特定次谐波消除调制方式的谐波特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 11-19.
- [28] 徐政,屠卿瑞,裘鹏. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3070-3077.
- [29] 丁冠军,丁明,汤广福. VSC-HVDC 主电路拓扑及其调制策略分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 64-68.
- [30] 李骈文. 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.
- [31] SCHAUDER C, STACEY E, LUND M, et al. AEP UPFC Project: Installation, Commissioning and Operation of the ± 160 MV · A STATCOM (phase I)[C]// IEEE Transactions on Power Delivery. IEEE, 1998.
- [32] 徐淑梅. 联合电力潮流控制器(UPFC)在美国电力公司投运[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 78-79.
- [33] 苏玲,陈建业. 可转换式静止补偿器——一种新型 FACTS 控制器[J]. 国际电力, 2003, 7(1): 21-23.
- [34] ARABI S, HAMADANIZADEH H, FARDANESH B. Convertible Static Compensator Performance Studies on the NY State Transmission System[C]// IEEE Transactions on Power System. IEEE, 2002.
- [35] KIM S Y, YOON J S, CHANG B H, et al. The Operation Experience of KEPCO UPFC[C]// Electrical Machines and Systems. 2005.
- [36] 王华雷,伏祥运,汤奕,等. 基于滑模变结构的含多 FACTS 电力系统稳定性协调控制[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4): 1-4, 9.

作者简介:

陈刚(1972),男,江苏苏州人,高级工程师,主要从事电力系统调度运行、电力系统规划以及柔性交直流输电等研究工作;
 刘建坤(1980),男,山东潍坊人,高级工程师,主要从事电力系统仿真分析、电力系统规划和运行以及柔性交直流输电等研究工作;
 李群(1967),男,江苏靖江人,研究员级高级工程师,主要从事电力系统分析、电能质量以及柔性交直流输电等研究工作。

(下转第 27 页)

表 2 第二阶段潮流计算结果

节点	电压幅值 / p.u.	电压相角 / (°)	注入功率 / p.u.
1	1.050	18.66	3.000 + j0.030
2	1.053	13.99	-1.876 + j0.639
3	0.984	-2.23	-4.000 - j1.000
4	1.050	0.00	1.339 + j2.337
5	1.038	14.39	0.076 - j0.171
6	0.956	32.80	1.800 + j0.000

5 结束语

分析了在基于电力系统仿真软件 PSS/E 实现含 UPFC 的电力系统潮流计算和动态仿真的过程中,常规含 UPFC 的潮流计算方法存在的问题,并提出了一种两阶段的含 UPFC 的电力系统潮流计算方法:第一阶段给定一组特殊的 UPFC 输出变量,使常规潮流计算程序能够直接计算含 UPFC 的电力系统潮流;第一阶段的潮流计算结果作为第二阶段的初始运行点,在动态仿真程序中将潮流控制到目标值,得到目标潮流下的潮流计算结果。

参考文献:

- [1] 宋莉. 计及 UPFC 的可用输电能力研究[D]. 吉林:东北电力大学,2009.
- [2] 赵渊,杨晓嵩,谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):55-60.
- [3] 刘青,马朋,邹家平. 基于 WAMS 的 UPFC 装置的附加控制

- 器设计[J]. 华北电力技术,2015(2):13-18.
- [4] 蔡晖,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设,2015(8):73-78.
- [5] 徐政,张扬. 用常规潮流程序直接计算含统一潮流控制器的电力网络潮流[J]. 电网技术,1998,22(10):40-43.
- [6] 陈淮金,白中. 含 UPFC 电力系统的潮流计算研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(3):23-27.
- [7] 郎兵. 含 UPFC 电力系统的潮流计算研究[J]. 华北电力技术,1998(7):15-18,55.
- [8] 张扬,毛雪雁,徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术,2002,26(7):30-33.
- [9] 黄振宇,倪以信,陈寿孙,等. UPFC 动态模型在电力系统动态分析中的实现[J]. 电力系统自动化,1999,23(6):26-30,53.
- [10] 刘皓明,朱浩骏,严正,等. 含统一潮流控制器装置的电力系统动态混合仿真接口算法研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):1-7.

作者简介:

- 宋鹏程(1990),男,山东淄博人,博士研究生,从事大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电相关研究;
- 王莹(1986),女,江苏常州人,工程师,从事电力系统规划相关工作;
- 许文超(1979),女,江苏东台人,高级工程师,从事电力系统规划相关工作;
- 徐政(1962),男,浙江海宁人,博士生导师,从事大规模直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术相关研究。

Load Flow Calculation Study for Power Systems Containing UPFC

SONG Pengcheng¹, WANG Ying², XU Wenchao², XU Zheng¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhengjiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, the conventional method for calculating load flow of power systems containing unified power flow controllers (UPFCs) is analyzed. The drawbacks of this approach during performing load flow calculation and dynamic simulation of power systems containing UPFC in PSS/E (Power System Simulator for Engineering) are discussed. A novel two-stage method for calculating load flow of power systems containing UPFCs is proposed. Case studies validate the the proposed method.

Key words: unified power flow controller (UPFC); load flow; PSS/E

(上接第 6 页)

State of the Art and Application Analysis of Unified Power Flow Controller

CHEN Gang¹, LIU Jiankun², LI Qun²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: As the most comprehensive and complicated FACTS technology, unified power flow controller's technical principle and operation mode are introduced in this paper. Also the converter technology is detailed analyzed as well as the application and background overboard. This paper also discusses the necessity, system scheme, typical topology, converter access technology and DC field scheme of the UPFC project in Nanjing western power grid. At last, the comprehensive benefits of UPFC are demonstrated. Analysis results show that UPFC plays an important role in solving the power flow control problems facing Nanjing western power grid.

Key words: flexible AC transmission; unified power flow controller; modular multilevel converter; power flow control; stability