

[无功补偿]

东北电网统一潮流控制器 应用场景研究

文/刘天慧 徐 栋 季时宇 张广玉
中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司

统一潮流控制器 (UPFC) 是并联补偿STATCOM和串联补偿SSSC的组合, 具有强大的无功补偿与潮流控制能力, 可有效改善新能源并网特性, 大幅提高现有输电通道输电能力, 是电网适应新能源规模并网送出的重要技术选择。结合东北电网特点对统一潮流控制器在东北的应用场景进行了适应性研究。

目前, 统一潮流控制器 (The Unified Power Flow Controller, UPFC) 在我国500 kV电力系统已有成熟应用经验, 关键技术和设备可实现国产化。2015年, 国家电网重大科技示范工程、江苏南京220 kV西环网“统一潮流控制器”工程正式投运。2017年, 当时“世界电压等级最高、容量最大”的500 kV统一潮流控制器工程在苏州建成投运。目前世界上有6座UPFC站, 其中我国有3座, 分别在南京、上海和苏州。

UPFC中的SSSC在阻抗补偿和电压补偿两种控制模式下的次同步频段等效电抗和等效电阻均为正, 较纯固定电容补偿, 含SSSC的混合串补装置有助于改善系统的次同步振荡问题。同时, 随着SSSC补偿阻抗或补偿电压的增大, SSSC装置对系统电压的调节作用增强, 系统的次同步振荡阻尼亦随之增大。

UPFC中的STATCOM可在电网大扰动事故后向接入点快速注入无功功率, 尽快恢复并网电压, 提高风电场高低电压穿越能力, 增强风电场的稳定性。同时, 通过改变参考电压值对UPFC中的SSSC进行控制, 可灵活地控制联络线的功率, 优化潮流分布。此外, 随着风电重点开发地区装机规模的不断增加, 部分既有通道出现输电能力瓶颈, 限制风电尖峰电力外送。但由于环境保护等因素, 建设新

的超高压输电线路造价大大提高, 并且十分困难。UPFC可更有效地利用现有输电网络, 在不降低电力系统运行可靠性的前提下, 大大提高线路的输送能力, 是未来东北电网柔性交流输电的示范应用重点。

统一潮流控制器应用情况

目前, 国外已有3套UPFC工程应用, 分别为: 美国Inez地区UPFC工程, 电压/容量为138 kV/320 MV·A; 韩国Kangjin地区UPFC工程, 电压/容量为154 kV/80 MV·A; 美国纽约Marcy地区可转换静止补偿器 (Convertible Static Compensator, CSC), 其为UPFC结构优化的装置, 电压/容量为345 kV/200 MV·A。其中, 美国Inez工程和韩国Kangjin工程是对单条线路进行潮流控制, 美国CSC工程通过结构变换, 可以对两条线路进行潮流控制, 一个换流器故障后仍可以保证在电力网络结构不变时对系统进行潮流优化控制。

南京西环网UPFC示范工程是我国第一个UPFC工程, 是世界第一套基于MMC技术的UPFC工程, 接入系统电压等级/单个换流器容量为220 kV/60 MV·A, 工程于2015年投运。随着电网负荷的不断增长, 作为南江城网主要负荷中心的南京西环网

发电和负荷分布不均衡的问题日益凸显，主要表现为南北通道潮流分配不均，北通道断面潮流过重、南通道断面输送能力未被充分利用。且由于区域相关输电通道资源稀缺等因素，电网建设难度较大。为控制关键断面潮流，提升南京西环网供电能力，建设南京西环网UPFC示范工程如图1所示。

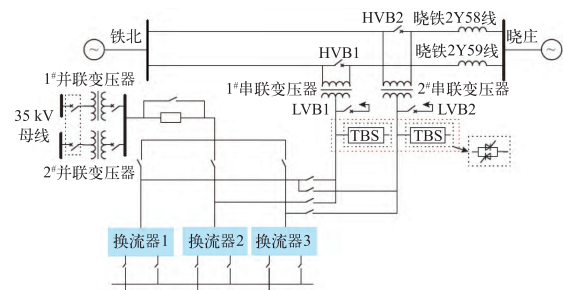


图1 南京西环网UPFC工程系统结构

上海蕴藻浜UPFC工程接入系统电压等级/单个换流器容量为220 kV/100 MV·A，工程于2017年投运。上海闸北-蕴藻浜3回输电线路中，闸蕴2258线路阻抗与其他两回闸蕴2210和闸蕴2205线路存在差异，导致断面潮流分布不均，为合理控制线路潮流，提高输电断面输送能力，建设上海蕴藻浜UPFC工程。

东北电网统一潮流控制器应用场景研究

东北地区能源资源分布不均，电源主要集中在西部和东北部，负荷中心集中于哈（哈大齐牡发展带）长（长吉图发展带）沈（沈阳经济区、京沈经济轴带）大（辽宁沿海经济带）。随着负荷的不断发展以及风光间歇性电源的大规模、高比例并网，省间既有通道输电压力不断增加。一方面，受潮流分布不均影响，既有输电线路输电能力未得到充分利用；另一方面，由于环境保护等因素影响，建设新的超高压输电线路造价大大提高，并且十分困难。UPFC可有效利用现有输电网络，在不降低电力系统运行可靠性的前提下，满足受端供电和送端间歇性电力传输需要，大大提高线路的输送能力。统一潮流控制器基本拓扑结构如图2所示。

基于前述统一潮流控制器功能特点，结合东北电网特点及未来发展方向，总结提出东北电网应用UPFC的三大类场景。具体为：提升交流输电断面的可用输电能力；优化电力市场环境下的输电通道

阻塞；精准定向定量控制指定线路潮流。

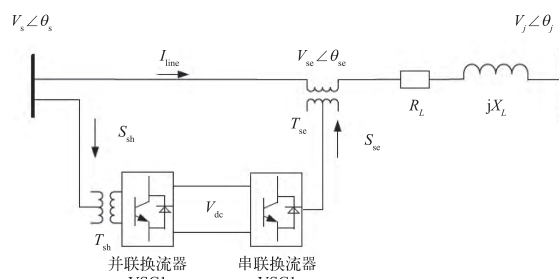


图2 统一潮流控制器基本拓扑结构

1. 提升交流输电断面的可用输电能力

输电断面一般表示系统中有功潮流方向相同且电气距离较近的一簇输电支路，输电断面能力往往受制于通道上的薄弱线路。受电网的负荷分布、输电通道线路长度和输送能力差异等因素影响，断面上的不同线路负载率存在一定差异。同时，在受端电网高峰负荷情况下，系统整体电压偏低，若重载外区送入通道发生线路跳闸、断线等故障，将导致潮流大规模转移，在潮流突增的元件中无功损耗迅速增大。若系统无功储备不足，极易造成电压失稳等稳定问题，进而导致事故范围进一步扩大。在这种条件下，通过在区域间送电通道或送电断面薄弱环节加装UPFC装置，能够将电网薄弱环节潮流限制在理想运行水平，优化解决潮流分布不均衡而造成的断面中通道闲置或长期重过载问题，挖掘电网可用输电能力，提升资产整体利用效率。同时，UPFC的无功补偿及动态电压支撑能力能够提高所在电网的稳定水平，在发生故障的情况下提供电压支撑。

2. 优化电力市场环境下的通道阻塞

采用UPFC装置进行潮流控制是解决输电阻塞的一种有效的技术手段。目前，新增输电通道、建设新线路越来越困难，使得人们把目光逐渐投向电力网络内部，通过对潮流的调整和控制，充分挖掘现有网络的输送容量，通过在主要电源送出断面及受端主要受入断面发生阻塞的通道或线路上装设UPFC装置，改善潮流分布，可解决由于线路受阻及节点电价差异造成的无效交易问题，同时增加调度部门在电力市场环境下的调度灵活性及电力市场交易的包容性。随着电力电子技术的不断进步以及大功率电力电子元件成本的降低，电力网络中将

有更多的潮流控制装置投入运行，UPFC在电力市场环境具有良好的应用前景。

3. 精准定向定量控制指定线路潮流

在建设大电网的背景下，区域间电网联络及部分区电网结构都日益复杂，不同区域电网运行要求也不尽相同，对电力的定向定量传输要求与日俱增，为使系统运行在某一特定潮流模式下，会限定某些线路的潮流传输容量，以使潮流按照指定的路径和容量进行传输。UPFC装置能够根据系统实际需要合理改善电网断面潮流分布，使断面及线路输送功率保持在一个较为稳定的水平，降低由于部分地区电力突增或突减对系统的冲击，同时UPFC的动态无功补偿及动态电压支撑能力能够改善风电等新能源接入后的电压波动问题，为风机等运行中较高的无功补偿需求提供无功支撑能力，在风机切机等操作时稳定系统电压水平，提高新能源电力送出可靠性，为调度新能源提供技术支持。

东北电网统一潮流控制器应用设想

随着东北地区社会经济的高速发展和城市电网负荷的持续增长，对电能质量的要求不断提高。传统电网加强方案面临越来越大的困难和挑战。如城市电网输电通道资源越来越紧张，用电负荷和供电容量增加带来的短路电流超标问题，土地资源有限站址的选择越来越难，环境保护的客观要求等，这些因素极大地制约了特大型城市的进一步发展。

UPFC技术可以快速地对功率进行控制，稳定电压，有效地改善供电的电能质量；且不需要占用输电走廊，既能达到城市电网增容的目标，又不影响城市市容；同时基本不增加系统短路电流。这些特点决定了其在以沈阳、哈尔滨为代表的大城市电网增容扩建中大有用武之地。以下以辽西电网UPFC增容供电进行相关分析。

在辽西—辽中通道控制线路加装UPFC，动态调整直流功率，优化潮流分布，实现事故下紧急功率转移，减少新建通道规模，提高通道利用效率。潮流计算结果表明，徐大堡核电投运后，原拟定辽西—辽中加强方案可满足电力最大外送需求。但北宁—王石第二回线路建设困难，若该线路未建设，北宁—辽中同塔双回线路故障后由于潮流分布不均，北宁—王石线路输电203万kW，存在过载的风险

(35℃时204万kW、40℃时188万kW)。UPFC工程建设后，可优化潮流分配，增加松山—鹤乡潮流，北宁—王石线路输电下降至190万kW，过载风险大幅下降，北宁—王石第二回线路可取消建设。可见，UPFC工程建设后，可优化通道各线路间潮流分布，提高通道输电能力约100万kW。

上述分析表明UPFC优化潮流分布作用明显，可减少通道线路新建规模，提高通道利用效率。不同温度下架空线极限有功输送能力见表1。

表1 不同温度下架空线极限有功输送能力

序号	导线型号	长期允许电流/A	25℃极限有功输送容量/万kW	35℃极限有功输送容量/万kW	40℃极限有功输送容量/万kW
1	LGJ-300×4	2840	232	204	188
2	LGJ-400×4	3200	277	244	224
3	LGJ-500×4	3864	316	278	256
4	LGJ-630×4	4500	368	324	298
5	LGJ-720×4	5000	409	360	331

结束语

随着东北电网的不断发展，尤其是风电等间歇性电源的规模并网，部分既有重要断面潮流波动较大；各组成线路潮流分布不均，部分方式下面临“卡脖子”问题，同时由于输电走廊紧张，新增通道建设困难，难以保障电网的安全稳定运行。此种场景下，可考虑加装UPFC装置，动态调整线路功率，达到优化断面各组成线路潮流分布、事故下紧急转移功率的目的，进而提高通道利用效率。EA

(收稿日期：2023-10-15)

参考文献

- [1] 周宁，张章，梁涛，等. 统一潮流控制器近端母线的短路电流计算方法[J]. 电力系统自动化，2020，44(15): 95-102.
- [2] 郑涛，汤哲，张滋行，等. 统一潮流控制器对继电保护的影响及对策研究综述[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(15): 171-178.
- [3] 曾晔，李春来，兰雄，等. 新型电力电子磁性材料在微型电流互感器中的应用与分析[J]. 电工技术，2021(23): 115-117.
- [4] 韩秀. 基于潮流熵评估的潮流均衡度最优化方法[J]. 电气应用，2022，41(4): 77-82.