

· 统一潮流控制器技术应用专题 ·

考虑 UPFC 实时控制策略的电网功率调节能力研究

韩冰¹, 张宁宇², 胡昊明², 陈静²

(1. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004;

2. 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:提出一种考虑统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)系统级和换流器级控制策略的线路功率调节能力计算方法,实现了电网正常运行和 $N-1$ 情况下UPFC对线路潮流有效控制范围的计算。介绍了UPFC工程的控制策略,在考虑并联侧定电压控制和定无功控制特性的基础上实现潮流分析,并以南京西环网UPFC为例,基于江苏电网的实时运行数据对UPFC的实际潮流控制范围进行计算,为电网调度运行提供参考。

关键词:统一潮流控制器;换流器;控制策略;潮流计算

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0001-07

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)可同时对节点电压、相角和线路阻抗进行控制,集合了静止同步补偿器、静止无功补偿器、移相器、可控串联补偿、短路电流限制器等装置的控制特点^[1-6]。对于电网调度人员而言,虽然UPFC提供了电网潮流控制的一条新的途径,但受负荷变化、发电厂出力调整和运行方式等影响,UPFC潮流调节范围不断发生变化。如果UPFC的控制目标设置不合理,则可能对电网运行起到适得其反的作用。因此,为提高南京西环网UPFC装置的运行效率,保证电网潮流的合理运行,减轻调度人员的工作强度,开展UPFC对于实际电网的功率调节研究有着迫切的需求。

国内外对UPFC功率调节范围的研究现状如下:文献[7-8]在假设UPFC所在线路两端节点电压恒定的情况下,通过改变串联侧电压的幅值、相角计算得到UPFC功率控制范围为椭圆形,但所采用的模型较为简单,导致结果与电网实际运行情况相差较大。文献[9-10]研究了UPFC并网后对电网潮流的影响,并提出了相应的控制策略。文献[11]对考虑UPFC的电网随机潮流计算方法进行了研究,并得到电压和线路潮流的概率密度曲线。文献[12]研究了UPFC控制策略对功率调节范围的影响,并采用潮流计算方法实现了求解,但忽略了电网中线路载流能力对UPFC运行的影响,且UPFC并联侧控制策略采用的定电压控制策略与实际工程存在差异。也有学者对南京西环网的结构

设计、控制特性和运行情况等进行研究。文献[13]分析了南京西环网UPFC的系统级控制策略,该策略保证电网正常运行或 $N-1$ 情况下线路潮流能够运行在合理范围内。文献[14-15]结合南京西环网UPFC的结构特点,提出一种串联变压器的启动方法,降低了启动过程中对变压器、换流器和系统的影响。文献[16]在分析比较各种双回线路UPFC控制特性的基础上,分析南京西环网UPFC工程的接线拓扑方案在可靠性和经济性等方面的优点。

本文基于UPFC结构特性和控制特性^[17],提出一种用于南京西环网UPFC功率调节能力的计算方法,实现了电网正常运行和 $N-1$ 情况下南京西环网UPFC对实际线路潮流的控制作用分析。该方法不仅考虑UPFC并联侧定无功控制和定电压控制策略,同时结合了UPFC的系统级控制策略等,提高了计算结果的精确性。最后使用Python语言在仿真软件PSS/E中基于江苏电网的实时运行数据对南京西环网UPFC的实际潮流控制范围进行计算,结果可用于指导UPFC的在线调度运行。

1 南京西环网UPFC工程简介

1.1 系统结构

南京西环网UPFC工程主要解决晓庄断面和西环网南部断面潮流分布不均衡的问题,工程投运后的系统接线如图1所示。

由于受占地、施工等因素的限制,UPFC直接加装在晓庄—中央、晓庄—下关线路,对断面功率进行控制存在着困难。经过工程选址分析,选择在经港—晓庄双线开断环入铁北变后,在铁北—晓庄双回线路上加装UPFC。南京西环网UPFC工程主要由3台换流器组成。其中1台换流器通过并联变压

收稿日期:2017-09-05;修回日期:2017-10-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51707090)

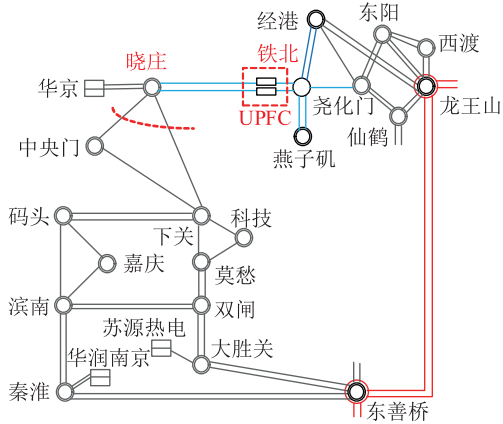


图1 南京西环网 UPFC 工程接入系统示意图

Fig. 1 Integration diagram of Nanjing UPFC project

器接入燕子矶变 35 kV 母线,组成并联侧。另外 2 台换流器分别通过串联侧变压器接入铁北至晓庄线路,组成串联侧。并联侧和串联侧通过直流母线连接,如图 2 所示。

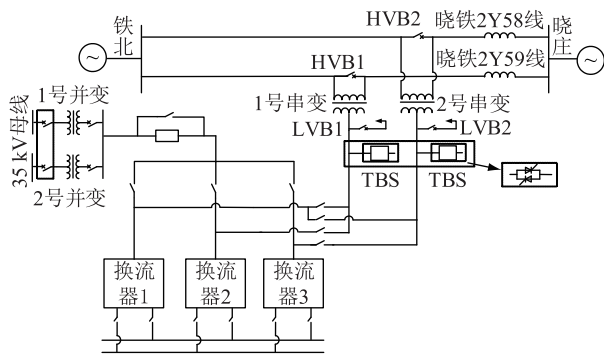


图2 南京西环网 UPFC 主回路拓扑

Fig.2 Main circuit topology of Nanjing UPFC project

1.2 系统级控制策略

UPFC 工程的系统级控制策略如下:

(1) 调度员手动控制模型,在保证晓庄南送断面、铁北—晓庄双线功率不过载情况下,可设定 UPFC 的功率控制目标,以保证电网运行可靠前提下,提高电网调度的灵活性。

(2) 正常运行情况下,通过 UPFC 调节铁北—晓庄功率,控制晓庄南送断面(即晓庄—下关、晓庄—中央)功率运行在额定载流量以内。

(3) 当晓庄南送断面 $N-1$ 后,需要 UPFC 迅速调节铁北—晓庄线路的功率,保证晓庄南送断面另一回路不过载。

(4) 当铁北—晓庄线路过载或 $N-1$ 过载时,优先控制铁北—晓庄线路功率不超过其功率限值。

上述系统级控制策略的优先级为:(1)<(2)<(3)=(4)。

1.3 换流器级控制策略

南京西环网 UPFC 工程采用串联侧和并联侧独

立控制的原则。串联侧换流器通过改变串联侧电压的幅值和相角实现晓庄—铁北双线功率的控制。并联侧换流器在维持 35 kV 母线电压恒定的同时,为串联侧换流器提供有功功率,以保证 UPFC 直流侧电压的稳定,其具体控制策略如下:

(1) 串联侧控制策略。

① 定无功控制。UPFC 串联侧换流器根据调度人员设定的线路无功功率控制目标运行。

② 定功率因数控制。UPFC 串联侧换流器根据调度人员设定线路有功功率控制目标和功率因数计算得到无功功率值进行控制。

(2) 并联侧控制策略。

① 定无功控制。当并联侧接入的 35 kV 母线电压运行在设定范围内时,保证并联侧换流器与电网的无功交换为恒定值。当 35 kV 母线电压超出设定范围时,UPFC 切换至定电压控制模式。

② 定电压控制。UPFC 变并联侧换流器通过控制注入电网的无功功率,保证 35 kV 母线电压运行在设定范围内。

2 UPFC 潮流模型分析

目前已有的 UPFC 潮流模型基本可分为两大类:一是统一求解法,即将 UPFC 的控制参数加入电网潮流模型中,利用 UPFC 参数的约束条件与电网潮流一同求解;另一种是交替求解法,利用中间变量对 UPFC 模型和电网潮流模型交替求解,最终实现潮流计算。

本文采用的 UPFC 等效解耦模型属于前者。基于 UPFC 的稳态数学模型,将 UPFC 对所在支路的潮流控制作用等效为两端节点的注入功率,避免了对原电网雅克比矩阵的修改。忽略 UPFC 并联和串联变压器的等效电阻以及所在线路的对地导纳后,得到如图 3 所示的稳态等值电路。其中, m 为虚拟节点; \dot{V}_{sh} 和 \dot{V}_{se} 分别为并联侧和串联侧等效电压源; X_{sh} 和 X_{se} 分别为并联和串联变压器的等效漏抗; \dot{I}_s 为流出节点 s 的电流; \dot{I}_m 为流入节点 m 的电流; \dot{I}_r 为流入节点 r 的电流; R_l 和 X_l 分别为 UPFC 所在线路的电阻和电抗。

将图 3 所示的等效电路图分解为解耦模型后,得到如图 4 所示的电路图。其中, P_{ms} , Q_{ms} 分别为 UPFC 注入至节点 s 的有功、无功功率; P_{sm} , Q_{sm} 分别为 UPFC 注入至节点 m 的有功、无功功率。

为便于分析,将 UPFC 并联侧的电流用 \dot{I}_{sh} 表示。流出节点 s 为正方向,并根据电压 \dot{V}_s 的方向分

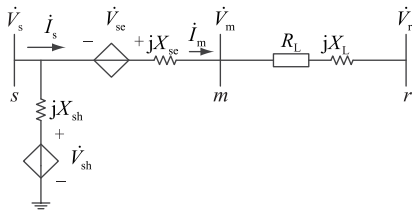


图3 UPFC 等效电路图

Fig.3 The equivalent circuit of UPFC

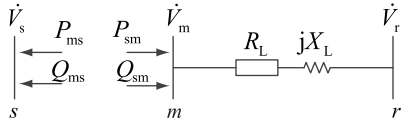


图4 UPFC 解耦模型

Fig.4 UPFC decoupled model

解为 $I_{sh,d}$ 和 $I_{sh,q}$, 即 $\dot{I}_{sh} = I_{sh,d} + jI_{sh,q}$ 。在此基础上得到 UPFC 注入功率的计算公式如下:

$$P_{ms} = - [V_s V_{se} \sin \theta_{se} + V_s V_m \sin(\theta_s - \theta_m)] / X_{se} - V_s I_{sh,d} \quad (1)$$

$$Q_{ms} = - [V_m V_s + V_s V_{se} \cos \theta_{se} - V_s V_m \cos(\theta_s - \theta_m)] / X_{se} + V_s I_{sh,q} \quad (2)$$

$$P_{sm} = - [V_m V_{se} \sin(\theta_m - \theta_s - \theta_{se}) + V_s V_m \sin(\theta_m - \theta_s)] / X_{se} \quad (3)$$

$$Q_{sm} = - [V_m^2 - V_s V_{se} \cos(\theta_m - \theta_s - \theta_{se}) - V_s V_m \cos(\theta_m - \theta_s)] / X_{se} \quad (4)$$

忽略 UPFC 有功损耗, 根据并联侧吸收的有功功率应与串联侧输入的有功功率平衡的原理, 存在如下等式:

$$P_{ms} = -P_{sm} \quad (5)$$

式(1—5)组成 UPFC 等效解耦模型, 考虑到南京西环网 UPFC 工程的串联侧 2 台换流器和变压器参数一致, 可等效为 1 台换流器和变压器按照等效模型进行计算。

3 UPFC 功率调节能力计算

由式(1—4)可知, UPFC 所在线路的有功、无功功率不仅受串联侧等效电压源 \dot{V}_{se} 的影响, 还取决于 UPFC 所在线路两侧节点电压 \dot{V}_s 和 \dot{V}_r 。在电网不同运行方式下, 负荷情况不同导致节点 s 和 r 的电压存在差异, 尤其是并联侧接入节点 s , 当 UPFC 并联侧采用不同控制策略时, 使得 \dot{V}_s 的变化情况进一步复杂。因此, 为计算 UPFC 的功率调节能力, 应首先确定 UPFC 并联侧不同控制策略下节点 s 的变化特性及相应的潮流计算方法。

3.1 并联侧接入节点的变化特性

针对上节中 UPFC 工程并联侧的 2 种控制策

略, 进行如下分析。

(1) 定无功控制。当并联侧接入的 35 kV 母线电压运行在设定范围内时, 并联侧换流器与电网的无功交换为恒定值, 此时节点 s 应为 PQ 节点。如 35 kV 母线电压超出设定范围, 则 UPFC 并联侧转换至定电压控制模式, 电压控制目标为上限或下限值, 节点 s 转换为 PV 节点。当并联侧换流器与节点 s 之间的交换功率达到换流器容量限值时, 节点 s 转换为 PQ 节点, 忽略 35 kV 母线电压的设定范围, 进行潮流计算。具体的流程如图 5 所示。

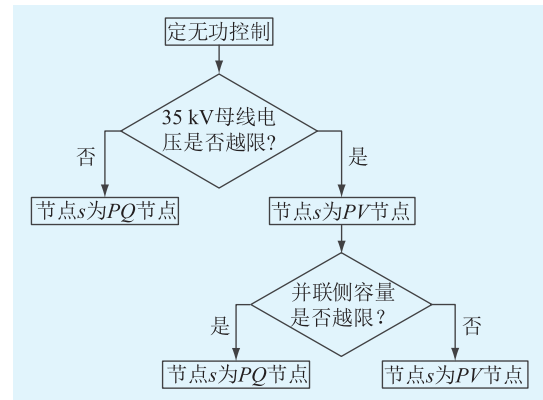


图5 定无功控制策略下的并联侧节点处理方式

Fig.5 Process of shunt bus in fixed reactive mode

(2) 定电压控制。当并联侧 35 kV 母线电压运行在设定范围内, 且 UPFC 变联侧与电网交换功率在换流器容量范围内时, 节点 s 应为 PV 节点, 但其电压可在设定范围内变化。当 UPFC 并联侧与电网交换功率超出换流器容量范围时, 节点 s 转换为 PQ 节点, 且忽略 35 kV 母线电压的设定范围, 具体的流程如图 6 所示。

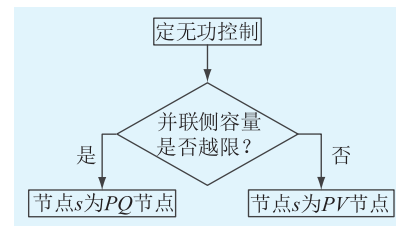


图6 定电压控制策略下的并联侧节点处理方式

Fig.6 Process of shunt bus in fixed voltage mode

3.2 考虑 UPFC 的潮流计算

由上一小节分析可知, 在 UPFC 并联侧不同控制策略下, 潮流计算中并联侧接入节点 s 在 PQ 节点和 PV 节点之间转换, 相对应的计算方法也存在差异。此外, 在计算 UPFC 功率调节能力时, 串联侧等效电压 \dot{V}_{se} 已知, 需要求解的是并联侧的注入电流 $I_{sh,d}$, $I_{sh,q}$ 和 UPFC 所在线路两端的节点电压 \dot{V}_s 和

\dot{V}_m 。因此,本小节对已知 \dot{V}_{se} 时 UPFC 并联侧接入节点 s 分别为 PQ 和 PV 节点时的潮流计算方法进行了研究。

(1) PQ 节点。当并联侧接入节点 s 为 PQ 节点时,由于 UPFC 并联侧换流器与节点 s 之间交换的无功为恒定,即 $I_{sh,q}$ 为已知变量,因此待求解变量包括 $I_{sh,d}$, V_s , θ_s , V_m 和 θ_m 。对 UPFC 的解耦模型分析可知,假设 V_s , θ_s , V_m 和 θ_m 已知的情况下,根据式(1—4)计算得到节点 s 和 m 的注入功率 P_{ms} , Q_{ms} 。 P_{sm} 和 Q_{sm} 作为注入功率代入至电网潮流计算,重新得到 V_s , θ_s , V_m 和 θ_m 。依次循环迭代,直至满足精度要求,然后根据式(5)计算得到 $I_{sh,d}$ 。

(2) PV 节点。当并联侧接入节点 s 为 PV 节点时, V_s 为定值,待求解变量包括 $I_{sh,d}$, $I_{sh,q}$, θ_s , V_m 和 θ_m 。潮流计算的方法与节点 s 为 PQ 节点时一致。计算完成后,可根据式(5)和节点 s 的实际注入无功功率得到 $I_{sh,d}$, $I_{sh,q}$ 。

3.3 UPFC 功率调节能力计算方法

为计算 UPFC 工程的最大潮流调节能力,首先读取电网的实时运行数据,并建立式(1—4)所示的 UPFC 稳态模型。根据工程实际参数将串联侧等效电压 V_{se} 设置为 $V_{se,max}$,将 2π 分为 N 等份后,依次代入 \dot{V}_{se} 。根据 UPFC 换流器级控制策略中的定电压或定无功控制策略选择图 5 或图 6 所示的并联侧接入节点的处理方式,进行潮流计算后得到铁北—晓庄双线和晓庄南送断面的实际潮流,如图 7 所示。基于 UPFC 系统级控制策略判断上述两个断面是否越限。如越限,则将 UPFC 实际功率调节能力设置为相应的限值;如未越限,则取铁北—晓庄的实际潮流。将 n 增加 1 后进入下一次循环,直至 \dot{V}_{se} 完成 2π 角度内的计算。

4 算例分析

为验证本文提出的考虑系统级和换流器级控制策略的 UPFC 功率调节能力计算方法的有效性,本节基于江苏电网的实际运行数据,在电网正常运行和 $N-1$ 情况下对南京西环网 UPFC 工程对铁北—晓庄双线的功率调节能力进行了计算,得到不同并联侧控制策略下的 UPFC 实际功率调节范围,最后与理论计算结果进行了对比分析。

南京西环网 UPFC 工程的主要参数如下:单个换流器容量 $60 \text{ MV}\cdot\text{A}$,串联侧最大输出电压 26.5 kV ,串联变压器漏抗 0.25 p.u. ,并联变压器漏抗 0.1 p.u. 。正常运行情况下断面功率限额如下:铁北—

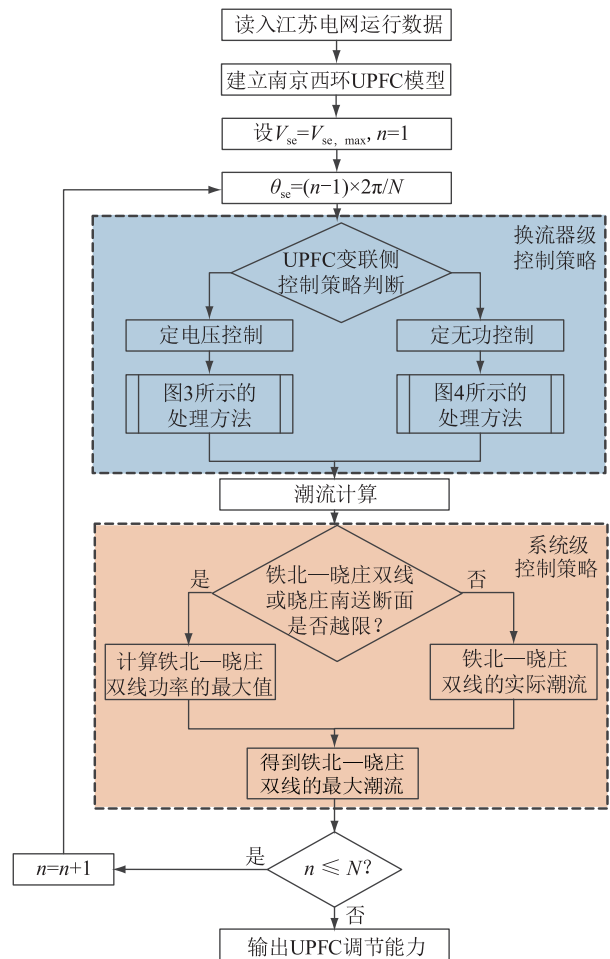


图7 南京西环网 UPFC 实际调节能力计算流程

Fig.7 Flow of UPFC's control capacity in Nanjing western power grid

晓庄断面功率 770 MW ,晓庄南送断面 650 MW 。晓庄南送断面在 $N-1$ 情况下,铁北—晓庄断面功率 900 MW ,晓庄南送断面 380 MW 。

江苏电网实时运行数据由江苏调度 D5000 系统中的电网安全在线分析系统(DSA)模块状态估计每隔 15 min 生成一次,包括了江苏 220 kV 及以上变压器、线路、电厂和负荷等,可用于江苏电网的离线运行分析计算。本节以江苏电网 2016 年 1 月 24 日 17:02 的运行数据为例展开仿真。计算软件采用 PSS/E 平台,利用 Python 语言进行编程。

4.1 南京西环网 UPFC 理论调节能力计算

在不考虑 UPFC 系统级和换流器级控制策略、铁北—晓庄双线和晓庄南送断面载流量的情况下,将 V_{se} 设置为 26.5 kV 。 A_{se} 在 $0 \sim 2\pi$ 变化时,利用式(1—5)计算得到南京西环 UPFC 在正常运行和晓庄南送断面 $N-1$ 后的理论最大潮流调节范围如图 8 所示。可见,UPFC 的理论最大控制范围为椭圆形,与文献[3]计算结果一致。其中,正常运行情况下

铁北—晓庄双线初始运行功率为 141.4 MW -j26.6 Mvar。在 UPFC 的调节下,铁北—晓庄双线有功、无功最大值分别为 1065.9 MW 和 894.5 Mvar,最小值分别为-783.1 MW 和 -953.4 Mvar。晓庄南送断面 N-1 时,铁北—晓庄双线初始运行功率为 84.7 MW -j24.6 Mvar。在 UPFC 的调节下,铁北—晓庄双线有功、无功最大值分别为 1 009.5 MW 和 897.9 Mvar,最小值分别为-840.1 MW 和 -949.1 Mvar。

可见,UPFC 的功率最大调节范围不仅取决于设备参数,还受到电网参数的影响,且随着电网运行方式的改变,南京西环网 UPFC 的功率最大控制范围处于不断变化的状态。

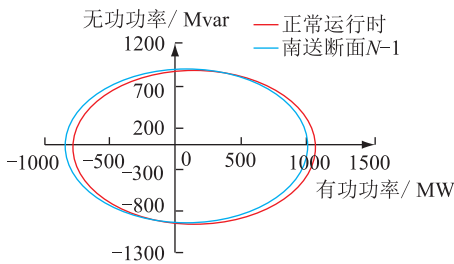


图8 南京西环网 UPFC 最大潮流调节能力的理论计算值

Fig.8 Theory value of UPFC's control range

4.2 正常运行时南京西环网 UPFC 实际调节能力计算

电网正常运行时,南京西环网 UPFC 并联侧分别采用定电压控制和定无功控制策略,铁北—晓庄双线功率的最大控制范围如图 9 所示。在不考虑晓庄南送断面功率最大限额时,UPFC 定电压控制策略和定无功控制策略下的铁北—晓庄双线有功功率控制范围均为-142.1~425.5 MW。当铁北—晓庄双线功率大于 225.9 MW 时,晓庄南送断面功率超过 650 MW。此时,如晓庄南送断面发生 N-1,另一回线将发生过载。为保证晓庄南送断面的稳定运行,铁北—晓庄双线功率的控制范围变化减小至-142.1~225.9 MW。可见,UPFC 并联侧的控制策略对有功功率的控制范围影响较小。UPFC 定电压控制策略和定无功控制策略下的铁北—晓庄双线无功功率控制范围分别为-406.1~362.2 Mvar 和 -406.1~344.1 Mvar。可见,UPFC 并联侧定电压控制策略下的无功控制范围略大于定无功控制策略。

4.3 晓庄南送断面 N-1 时南京西环网 UPFC 实际调节能力计算

晓庄南送断面 N-1 情况下,南京西环网 UPFC 并联侧分别采用定电压控制和定无功控制策略时,铁北—晓庄双线功率的最大控制范围如图 10 所示。

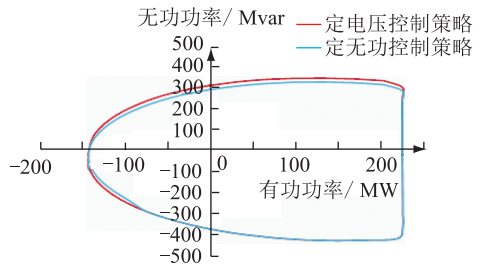


图9 电网正常运行时南京西环网 UPFC 最大潮流调节能力

Fig.9 UPFC's control range in normal operation

受 UPFC 系统级控制策略的影响,为保证晓庄南送断面功率在稳定限额以内,铁北—晓庄双线有功功率最大值为-44.8 MW (“-”表示晓庄向铁北方向输送有功功率),有功功率最小值受变联控策略的影响,分别为-165.5 MW 和 -165.2 MW。定电压控制、定无功控制策略下铁北—晓庄双线无功功率的控制范围分别为-356.4~319.2 Mvar 和 -337.0~310 Mvar。

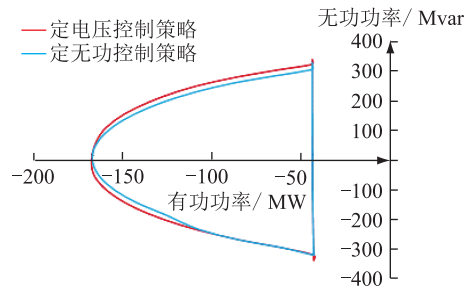


图10 晓庄南送断面 N-1 时南京西环网 UPFC 最大潮流调节能力

Fig.10 UPFC's control range in N-1 operation

综上所述,上述 3 种情况下的南京西环网 UPFC 对铁北—晓庄双线潮流控制的最大范围如表 1 所示。

表 1 UPFC 控制范围比较

Tab.1 Comparison of UPFC's control range

项目	控制策略	有功功率/MW		无功功率/Mvar	
		最大值	最小值	最大值	最小值
正常运行	理论计算	1065.9	-783.1	894.5	-953.4
	定电压控制	225.9	-142.1	362.2	-406.1
	定无功控制	225.9	-142.1	344.1	-406.1
晓庄南送断面 N-1	理论计算	1009.5	-840.1	897.9	-949.1
	定电压控制	-44.8	-165.5	319.2	-356.4
	定无功控制	-44.8	-165.2	310	-337.0

由表 1 可见,在正常运行和晓庄南送断面 N-1 情况下,UPFC 的实际功率控制范围要远小于理论计算值。这是由于理论计算时,只考虑了 UPFC 改变所在线路电气距离的“绝对值”。而实际电网运

行时,UPFC 的线路功率控制范围不仅取决于 UPFC 所在线路的电气距离的“绝对值”,还取决于与其他输电走廊电气距离的相对大小。

5 结论

为分析南京西环网 UPFC 工程投运后对电网功率的实际调节能力,本文提出一种考虑 UPFC 系统级和换流器级控制策略的功率调节能力计算方法。具体为在潮流计算中考虑了控制策略对于电网潮流的影响。基于江苏电网实时运行数据,在 PSS/E 中基于 Python 语言实现了理论计算、电网正常运行和晓庄南送断面 $N-1$ 后 UPFC 对铁北—晓庄双线路潮流的控制范围的计算,并对结果进行了比较。分析可见,UPFC 工程实际的功率调节范围远小于理论计算值。这是由于 UPFC 控制范围不仅取决于设备本身的设计参数和控制策略的影响,还取决于电网结构、负荷和运行情况等。

参考文献:

- [1] WANG Puyu, ZHANG Xiaoping, COVENTRY P F, et al. Control and protection strategy for MMC MTDC system under converter-side AC fault during converter blocking failure [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 272-281.
- [2] 谭振龙, 张春朋, 姜齐荣, 等. 旋转潮流控制器与统一潮流控制器和 Sen Transformer 的对比[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 868-874.
TAN Zhenlong, ZHANG Chunpeng, JIANG Qirong, et al. Comparative research on rotary power flow controller, unified power flow controller and Sen Transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 868-874.
- [3] 李海峰, 王相峰, 陈中, 等. 统一潮流控制器相角控制策略与矢量控制策略的量化比较方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2330-2336.
LI Haifeng, Wang Xiangfeng, CHEN Zhong, et al. Quantitative comparison methods of a power-angle controlled and vector-current controlled UPFC[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2330-2336.
- [4] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及谐波特性分析[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 harmonic analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [5] GYUGYI L, SCHSTRUDER C D, EDRIS A. The unified power flow controller; a new approach to power transmission control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [6] 刘梨明, 康勇, 陈坚, 等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 114-119.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Control scheme and implement of a unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 114-119.
- [7] 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, 2014.
XIE Xiaorong, JIANG Qirong. Principle and application of flexible AC transmission system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [8] 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
Unified power flow controller technology and applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [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] 仇志华, 徐丙垠, 陈青. 基于统一潮流控制器的配电环网潮流优化控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 122-126.
ZHANG Zhihua, XU Bingyin, CHEN Qing. Control strategies for UPFC-based optimal power flow of distribution network with normally closed-loop operation[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 122-126.
- [11] 张宁宇, 周前, 胡昊明, 等. 计及统一潮流控制器的电网随机潮流计算方法[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 32-35.
ZHANG Ningyu, ZHOU Qian, HU Haoming, et al. A probabilistic load flow algorithm considering UPFC [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 32-35.
- [12] 郑华, 高芬. 统一潮流控制器潮流模型及功率调节能力分析[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 43-49.
ZHENG Hua, GAO Fen. Analysis of unified power flow controller model and its control capability of power flow [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 43-49.
- [13] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
QI Wanchun, YANG Lin, SONG Pengcheng, et al. UPFC system control strategy research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
- [14] 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): 159-171.
PAN Lei, LI Jihong, TIAN Jie, et al. Smooth start and stop strategies for unified power flow controllers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 159-171.
- [15] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 含统一潮流控制器的系统控制策略研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 46-50.
CAI Hui, QI Wanchun, HUANG Junhui, et al. Research on

the control strategy in UPFC-connected power systems [J].

Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 46–50.

- [16] 凌峰, 李九虎, 田杰, 等. 适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 113–120.

LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 113–120.

- [17] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC 动态建模及内部特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34:67–75.

SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic modelling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34:67–75.

作者简介:



韩冰

韩冰(1968—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化,智能电网研究工作(E-mail:hanbing@163.com)

张宁宇(1985—),男,博士,工程师,从事 FACTS 技术,电力系统规划与运行、并行计算研究工作(E-mail:zhangny190@163.com);

胡昊明(1987—),男,工程师,硕士,从事 FACTS 技术,电力系统仿真计算工作(E-mail:huhao ming1987@qq.com)。

Control Capability Analysis of Unified Power Flow Controller Considering Real-time Control Strategy

HAN Bing¹, ZHANG Ningyu², HU Haoming², CHEN Jing²

(1. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

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

Abstract: An algorithm of calculating the capacity of UPFC based on both system and converter strategy is proposed. The comparison of effect in normal and $N-1$ situation is researched. Control strategy of Nanjing UPFC project is introduced, while power flow is calculated based on UPFC parameters, voltage and reactive power control modes. Control range of UPFC is computed by PSS/E and Python with the real-time data of Jiangsu Power Grid. The result can improve the safety and reliability of Jiangsu Power Grid.

Key words: UPFC; converter; control strategy; power flow

(编辑 陈娜)