

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.032

采用潮流转移分布因子的UPFC控制值整定

陈 静, 李 群, 刘建坤, 周 前, 张宁宇, 安海云, 汪成根

(国网江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 目前,在含统一潮流控制器(unified power flow controller,UPFC)的电网静态安全分析中,UPFC的控制目标有功功率、无功功率通常采用典型运行数据进行离线分析,控制目标值由试探法确定,计算效率低且和实际运行工况存在一定的差异。为弥补现有控制策略整定方法的不足,文中提出了采用潮流转移分布因子的UPFC控制值整定方法,当电网发生 $N-1$ 故障时,基于直流潮流法定量计算控制目标值,通过UPFC的潮流控制功能消除线路 $N-1$ 过载,控制策略可根据能量管理系统(energy management system,EMS)数据在线刷新,可为电网调度提供辅助决策。算例仿真验证了文中算法的有效性和实用性。

关键词: 统一潮流控制器;潮流转移分布因子;控制值整定;预想故障控制策略表

Control Value Tuning of UPFC Using Power Flow Transfer Distribution Factors

CHEN Jing, LI Qun, LIU Jiankun, ZHOU Qian, ZHANG Ningyu, AN Haiyun, WANG Chenggen

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: At present, in the steady state analysis of power system, the control value of unified power flow controller is usually determined by trial method. And the calculation is based on offline typical operating data, which makes it inefficient and less accurate. In order to make up the defect of current analysis, an UPFC control value tuning method based on power transfer distribution factors is brought up in this paper. When $N-1$ line tripping fault occurs, based on DC power flow method, the control value is set and the $N-1$ line overload is eliminated by UPFC's power control. Furthermore, the control scheme list could be formed and updated based on energy management system(EMS) data. This method mentioned above could provide decision making support to power grid dispatching institutions. The results of a simulation example shows that the method is efficient and utilizable.

Key words: unified power flow controller(UPFC); power transfer distribution factors; control value tuning; control list of expected failures

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)对于解决目前电网中局部供电能力不足、线路输电效率不高^[1]、潮流控制手段缺乏等问题,提供了新的技术手段^[2]。

目前,在含UPFC的电网静态安全分析中,研究热点大多集中在给定控制值情况下的控制方法研究,如状态反馈精确线性化潮流控制策略^[3]、瞬时矢量控制算法^[4]、PID神经网络控制算法^[5]、多目标协调

控制策略^[6-9]等。控制值整定方面的研究并不充分,文[10]将UPFC的控制转化为优化问题,通过求解最优潮流获取UPFC所在支路的功率,作为控制值,但在电网发生故障时,发电成本、网损等经济性最优问题并不是主要矛盾。文[11]以潮流均衡度最小为目标,通过试探取值验证了UPFC对全网潮流的调节效果,但试探法效率较低且受人为因素影响较大。文[12]以UPFC输出的功率最小为目标提出了潮流控制策略,可以降低装置容量以兼顾经济性的要求,该策略在UPFC设计阶段具有一定的参考价值,在装置投运后则需进一步优化。

为了解决现有技术中的问题,文中提出采用潮

收稿日期:2017-04-09; 修回日期:2017-06-05

基金项目:国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-14-002)。

Project Supported by State Grid Company Science and Technology Project(SGRI-DL-71-14-002).

流转移分布因子^[13]的UPFC控制值整定方法,可以在线刷新计算电网预想故障控制策略表,查表设定UPFC的控制目标值,通过UPFC的功率控制,消除N-1过载。文中适用于安装有UPFC的分区电网控制策略整定,消除了电网常规静态安全分析中UPFC控制目标值的不确定性问题,提高了UPFC控制策略整定效率,可为电网调度提供辅助决策。

1 UPFC的计算模型

在稳态时,不考虑自身损耗,UPFC的两侧有功功率相等^[14],通过控制串联注入电压的幅值和相角,UPFC就可实现传统的电力传输中的串联补偿和移相等功能^[15]。考虑到UPFC稳态模型的特点,结合功率注入法^[16-18]能比较方便地给出其潮流模型,不需要修改节点导纳矩阵,也不增加潮流方程的数目,就可以实现与潮流元件的接口,UPFC的作用等效为安装线路两端的功率注入,见图1。

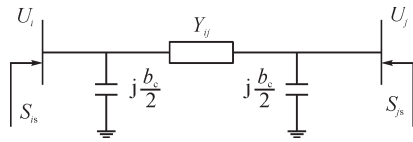


图1 UPFC功率注入等效模型

Fig. 1 Model of UPFC based on power injection method

根据功率注入法,UPFC数学模型可以表示为

$$\begin{cases} S_{is}=U_i[I_c-U_{pq}(y_{ij}+jb_c/2)]^* \\ S_{js}=U_j(U_{pq}y_{ij})^* \\ S_{ji}=U_j[(U_j-U_i)y_{ij}+jU_jb_c/2]^* \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $*$ 表示共轭相量; S_{is} 表示UPFC对*i*节点的注入功率; S_{js} 表示对*j*节点的注入功率; S_{ji} 表示所在线路无UPFC影响时*j*侧的传输功率(由*j*流向*i*)。同时,在线路中UPFC所在支路还必须满足下面平衡条件

$$\begin{cases} P_c+P_{pq}=0 \\ \sum Q_n+Q_i+Q_{is}=0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)分别对应UPFC装置本身的有功平衡及节点无功平衡。式(2)中: P_c 代表并联支路的有功功率; P_{pq} 则代表串联支路的有功功率; Q_n 表示相关线路注入节点*i*的功率; Q_i 代表节点*i*的注入功率; Q_{is} 表示UPFC对节点*i*的附加注入功率。

2 基于潮流转移分布因子的控制整定方法

2.1 计及UPFC的潮流转移分布因子

一条或多条支路开断引起其他支路的有功潮流变化可以用潮流转移分布因子进行描述^[9],在含UPFC的电力系统中,对于N-1可能引发线路过载的

情况,可通过UPFC的功率调节消除过载,其调节过程对电网潮流分布的影响可类比于双支路开断分布因子。假设UPFC安装支路为*l*、N-1开断支路为*k*、N-1过载支路为*j*,则支路*l*与支路*k*相对于支路*j*的分布因子为

$$D_{j,kl}=[X_{j,k}/x_j \ X_{j,l}/x_j] \begin{bmatrix} 1-X_{k,l}/x_k & -X_{k,l}/x_k \\ -X_{l,k}/x_l & 1-X_{l,k}/x_l \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

式(3)中: x_j 、 x_k 、 x_l 分别为支路*j*、*k*、*l*的阻抗值; $X_{j,k}$ 为支路*j*与支路*k*两个端口节点对之间的互阻抗,计算式为

$$X_{k,l}=M_k^T X M_l \quad (4)$$

式(4)中: M 为节点支路关联矩阵; X 为节点电纳矩阵的逆矩阵。同理可得 $X_{j,l}$ 、 $X_{k,k}$ 、 $X_{k,l}$ 、 $X_{l,k}$ 、 $X_{l,l}$ 分别为相应端口节点对之间的互阻抗。

2.2 UPFC控制整定方法

UPFC的控制整定目标为消除N-1过载,且不引起网络中其他支路过载。根据2.1节表达式,支路*k*开断后,通过UPFC的调节作用,支路*j*的传输有功功率为

$$P_j=P_j+D_{j,kl} \begin{bmatrix} P_k \\ \Delta P_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中: P_j 、 P_k 分别为支路*k*开断前支路*j*和支路*k*传输的有功功率; ΔP_l 为UPFC安装支路的有功功率变化值。对于含*n*条支路的网络,整定的约束条件为

$$|P_j|= \left| P_j+D_{j,kl} \begin{bmatrix} P_k \\ \Delta P_l \end{bmatrix} \right| \leq P_{jmax} \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式(6)中, P_{jmax} 为线路最大传输的有功功率限值。计算可得UPFC的功率整定值为

$$P_l=P_l-\Delta P_l \quad (7)$$

式(7)中, P_l 为支路*k*开断前UPFC安装支路传输的有功功率。

2.3 UPFC控制整定流程

文中所提基于潮流转移分布因子的UPFC控制策略可利用电网能量管理系统(energy management system, EMS)数据实时刷新,动态更新电网中可能存在的N-1过载情况及其控制策略,并形成预想故障控制策略表,为调度决策提供依据,其控制整定的流程图见图2。

首先,根据电网EMS,获取电网潮流及网架拓扑结构数据,对电网进行线路开断故障(N-1)扫描计算,若存在N-1过载的情况,则计算UPFC安装支路及N-1开断支路相对于N-1过载支路的潮流转移分布因子。再根据支路最大传输有功功率的约束条件,计算N-1故障后UPFC安装支路的功率控制目标值。最后将计算所得UPFC控制目标值,载入电网预想故障控制策略表,在检测到电网发生N-1故障时,

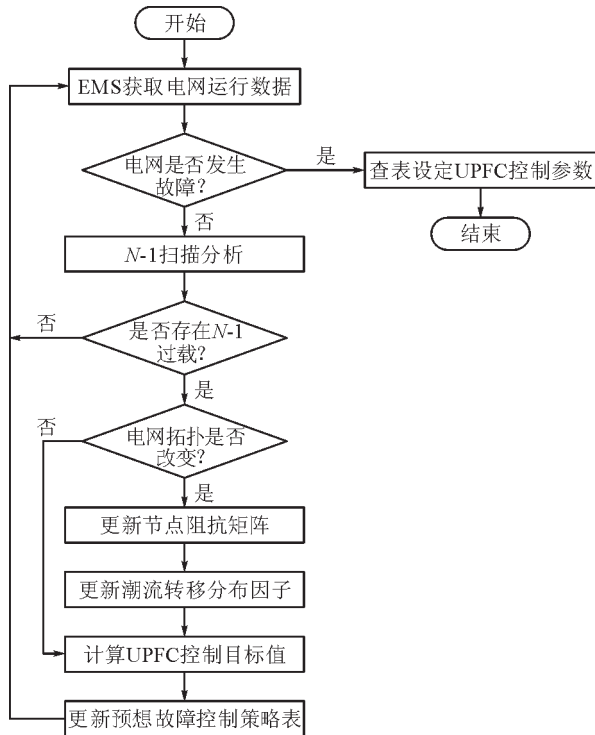


图2 UPFC控制整定流程

Fig. 2 Flow chart of UPFC control value tuning

查表设定UPFC的相应控制参数,通过UPFC的潮流控制功能消除N-1过载。

3 算例仿真

算例采用三机九节点系统,系统结构及各条线路电抗值(p.u.)标于图3(3个发电机节点未作编号),为简化计算示意过程,设定各支路最大传输的有功功率限值均为85 MW,功率基准值取为100 MW。

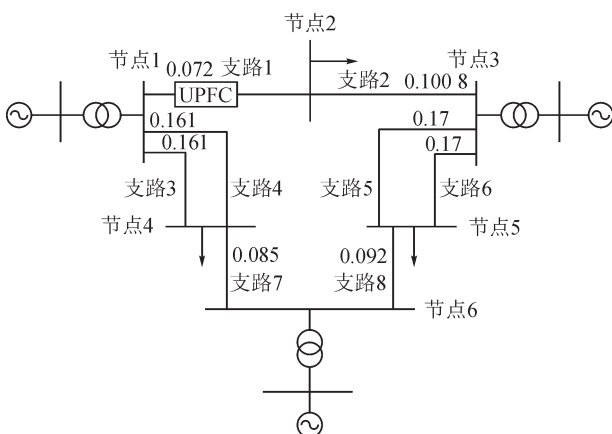


图3 算例系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test system

若UPFC不参与调节,则支路5开断后,支路8过载倍数1.09,潮流情况见表1。

需通过UPFC的功率调节消除支路8过载,且不引起其他支路过载,计算得UPFC安装支路1和开断支

表1 潮流计算结果(不含UPFC)

Table 1 Power flow result after a line tripping fault (without UPFC)

编号	I侧有功/p.u.	I侧无功/p.u.	I侧电流/A
支路7	0.373 23	0.025 91	0.362 13
支路1	0.739 92	0.044 57	0.716 32
支路6	0.584 59	-0.155 64	0.586 03
支路3	-0.439 11	-0.150 41	0.455 01
支路4	-0.439 11	-0.150 41	0.455 01
支路8	-0.927 96	-0.137 40	0.929 79
支路2	-0.264 55	-0.185 89	0.316 58

路5相对于其他各支路的潮流转移分布因子见表2。

表2 潮流转移分布因子计算结果

Table 2 Calculation results of power transfer distribution factors

因子	数值	因子	数值
$D_{1,51}$	[0.000 0 -1.000 0]	$D_{5,51}$	[-1.000 0 0.000 0]
$D_{2,51}$	[0.000 3 -0.997 3]	$D_{6,51}$	[1.000 3 -0.998 0]
$D_{3,51}$	[-0.000 2 0.500 5]	$D_{7,51}$	[-0.000 5 0.998 1]
$D_{4,51}$	[-0.000 2 0.500 5]	$D_{8,51}$	[-0.002 6 -0.990 1]

当UPFC运行在线路功率控制模式时,可调节UPFC所在线路的有功功率按照一定的斜率变化至控制目标值^[19-20]。在该算例中,随着UPFC安装支路1传输有功功率的上升,支路8的过载倍数逐渐下降,当支路1的有功调节为82.622 5 MW时,支路8恰好能消除过载,再结合线路最大传输有功的约束条件,计算得UPFC的调节范围为

$$82.622\ 5\ \text{MW} \leq P_l = P_l - \Delta P_l \leq 85\ \text{MW}. \quad (8)$$

为验证文中所提基于潮流转移分布因子的UPFC控制整定方法的正确性,设置UPFC的有功功率整定值为临界值82.622 5 MW,仿真计算得支路5开断后,通过UPFC的调节作用,系统潮流分布见表3。

表3 UPFC控制后的潮流分布

Table 3 Power flow results after UPFC control

支路号	I侧有功/p.u.	I侧无功/p.u.	I侧电流/A
支路7	0.457 99	0.003 04	0.442 98
UPFC支路	0.826 28	-0.007 94	0.796 72
支路6	0.675 24	-0.161 94	0.671 56
支路3	-0.397 03	-0.164 19	0.420 33
支路4	-0.397 03	-0.164 19	0.420 33
支路8	-0.841 42	-0.160 71	0.848 41
支路2	-0.174 39	-0.158 65	0.229 54

由表3可知,UPFC调节后消除了支路8过载,且未引起网络中其他支路过载。为进一步验证文中控制策略整定的有效性,计算UPFC支路不同调节目标

值的情况下支路8的潮流,并与仿真值进行比较,对比结果见图4。

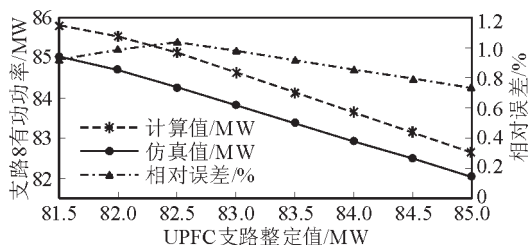


图4 计算值与仿真值的比较

Fig. 4 Comparison between calculation and simulation values

由图4可知,当仿真设置UPFC支路有功功率为81.509 MW时,支路8恰好能消除过载,此调节下限值略小于计算值82.622 5 MW,而在相同的UPFC支路整定值的情况下,过载支路8的潮流仿真值与计算值的最大相对误差为1%左右。误差的原因在于潮流转移分布因子基于直流潮流法推导,对潮流方程进行了简化处理,在对控制整定速度要求较高的场合,该精度误差在可以接受的范围内,因此文中所提方法在实际应用中是有效可行的。

4 结语

文中所提UPFC控制值整定方法,可以采集EMS运行数据,通过计算潮流转移分布因子,定量分析评估UPFC安装所在线路功率控制对 $N-1$ 过载支路传输功率的影响,在线计算刷新预想故障控制策略表,消除了控制目标值的不确定性,提高了UPFC控制策略整定效率。三机九节点系统仿真结果表明,上述控制整定方法可以有效消除支路 $N-1$ 过载,且整定目标计算值与仿真值误差较小。

在实际含UPFC的电网应用中,考虑到UPFC对电气距离较远的线路调节作用不明显,可首先对UPFC所在分区电网进行等值,降低潮流转移因子计算中阻抗矩阵的阶数,以提高计算速度增强实用性。

参考文献:

- [1] 董宸,周霞,李威,等.提升特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程,2013,3(5):1-4.
DONG Chen,ZHOU Xia,LI Wei,et al.A method for enhancing the transmission capacity of UHV power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,3(5):1-4.
- [2] 刘建坤,李群,陈静.基于UPFC的供电能力提升技术及其在江苏电网中的应用[J]. 电气应用,2014,33(17):20-24.
LIU Jiankun,LI Qun,CHEN Jing.Research on the improvement of power supply capability based on UPFC and its application in Jiangsu power system[J]. Electrotechnical Application,2014,33(17):20-24.
- [3] 闫博,汪可友,MARIESA L,等.UPFC状态反馈精确线性化潮流控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):42-48.
YAN Bo,WANG Keyou,MARIESA L,et al.UPFC power flow control strategy based on exact linearization via feedback[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(19):42-48.
- [4] 谭伟璞,贺仁睦,杨以涵,等.统一潮流控制器的瞬时矢量控制算法[J]. 电网技术,1999,23(7):10-14.
TAN Weipu,HE Renmu,YANG Yihan,et al.Instantaneous vector control algorithm of the UPFC[J]. Power System Technology,1999,23(7):10-14.
- [5] 傅仲佳,席自强,张佳,等.基于PID神经网络的UPFC潮流控制方法研究[J]. 湖北工业大学学报,2012,27(1):26-29.
FU Zhongjia,XI Ziqiang,ZHANG Jia,et al.The PID neural network based power flow control method for UPFC[J]. Journal of Hubei University of Technology,2012,27(1):26-29.
- [6] 张曼,张春朋,姜齐荣,等.统一潮流控制器多目标协调控制策略研究[J]. 电网技术,2014,38(4):1008-1013.
ZHANG Man,ZHANG Chunpeng,JIANG Qirong,et al.Study on multi-objective coordinated control strategy of unified power flow controller[J]. Power System Technology,2014,38(4):1008-1013.
- [7] 颜楠楠,傅正财.基于多目标粒子群优化算法的UPFC协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):43-48.
YAN Nannan,FU Zhengcai.Coordinated design of UPFC based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control,2010,38(8):43-48.
- [8] 邹振宇.多灵活交流输电控制器间交互影响分析及其协调控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
ZOU Zhenyu.Research on interaction analysis and coordinated control of the multiple FACTS controllers in power system[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2006.
- [9] 杜文娟,秦川,王海风,等.UPFC控制的协调设计-变参数开环解耦控制方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(8):19-23.
DU Wenjuan,QIN Chuan,WANG Haifeng,et al.Coordinated design of UPFC-a variable-parameter open-loop decoupling method[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(8):19-23.
- [10] 刘前进,黎雄,孙元章.基于PSASP程序的FACTS潮流建模[J]. 电力系统自动化,2000,24(7):6-9.
LIU Qianjin,LI Xiong,SUN Yuanzhang.A study of power flow control and optimization by UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(7):6-9.
- [11] 许海,杨尚瑾,宋晓通,等.UPFC潮流控制模型及控制特性研究[J]. 华北电力大学学报,2015,42(1):28-33.
XU Hai,YANG Shangjin,SONG Xiaotong,et al.Study on

- load flow control model and control performance of UPFC [J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(1): 28-33.
- [12] 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.
- [13] 张伯明, 陈寿孙, 严 正, 等. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. ZHANG Boiming, CHEN Shousun, YAN Zheng, et al. Advanced network analysis of power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [14] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. XIE Xiaorong, JIANG Qirong. Flexible AC transmission systems: Principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [15] 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. LI Pianwen. A brief introduction to principle of UPFC installed in INEZ substation of AEP system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 84-87.
- [16] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49. LI Guoqing, ZHAO Yuting, WANG Limeng. Available transfer capability calculation with unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 44-49.
- [17] 刘前进, 孙元章, 黎 雄, 等. 基于功率注入法的UPFC潮流控制研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3): 55-58. LIU Qianjin, SUN Yuanzhang, LI Xiong, et al. Power flow control characteristics of UPFC based on the power injected method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2001, 41(3): 55-58.
- [18] 韩 冰, 黄 梅, 苗友忠. 基于功率注入法的UPFC潮流分析算法研究[J]. 华北电力技术, 2009(10): 9-12. HAN Bing, HUANG Mei, MIAO Youzhong. Study of power flow analysis of power system with UPFC based on versatile power injection[J]. North China Electric Power, 2009(10): 9-12.
- [19] 鲁 江, 秦 健, 潘 磊, 等. 南京UPFC工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 1-5. LU Jiang, QIN Jian, PAN Lei, et al. Study on architecture and configuration for control and protection system of Nanjing UPFC project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 1-5.
- [20] 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.
- 陈 静(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性输电技术、电力系统运行与控制等。
- 李 群(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化运行与控制。
- 刘建坤(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性交直流输电技术。