

基于灵敏度的UPFC选址研究

周正宇¹, 王海潜², 祁万春², 吴熙¹

(1.东南大学电气工程学院,江苏南京210096;2.江苏省电力公司电力经济技术研究院,江苏南京210008)

摘要:统一潮流控制器(UPFC)具有很强的线路潮流控制能力,然而UPFC安装线路的不同,UPFC所具有的潮流调节能力是不同的。采用基于灵敏度分析的方法进行UPFC选址,首先建立UPFC直流潮流下的功率注入模型,缩减了控制变量数量,其次定义了有功潮流方差函数来反映UPFC调节能力对电网潮流的影响,进而对每条备选线路求得的指标进行灵敏度分析,求取控制变量的灵敏度,最终确定UPFC安装的线路。通过在IEEE14节点网络中进行计算,验证了该方法的准确性,同时该方法灵敏度计算简单方便,提高了计算效率,特别在大规模的电力系统中选址更有优势。

关键词:UPFC;灵敏度;选址;有功潮流方差函数

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2016)01-0033-04

统一潮流控制器(UPFC)的概念首先是由美国西屋科技中心的 Gyugyi T 博士在 1991 年提出的,是第三代柔性交流输电(FACTS)装置的典型代表,它综合了多种 FACTS 装置的控制手段,功能强大,被认为是最有创造性的 FACTS 装置,从提出至今一直都是广大学者研究的热点^[1]。1998 年美国将 UPFC 用于 AEP 的 INEZ 138 kV 变电站中,该 UPFC 的成功运行,不仅充分利用了原输电系统的容量,减少了有功损失,并有效防止电压崩溃,也验证了 UPFC 理论上的正确性和实践的可行性^[2]。

UPFC 具有强大的潮流调节能力和动态控制能力,可以改善系统潮流分布,减轻或消除线路重载状况;同时通过 UPFC 的控制作用,也可以提高系统的安全稳定性。UPFC 安装位置的选择关系着 UPFC 控制作用的发挥,因而显得尤为重要。UPFC 的选址问题是一个非线性的复杂问题,求解比较复杂。已有的文献资料普遍使用智能算法进行求解,文献[3]同时采用粒子群(PSO)和遗传(GA)算法,以线路网损为目标函数,通过对比发现 PSO 算法比 GA 算法速度更快,鲁棒性更好;文献[4]采用离散粒子群算法 DPSO,解决了装备多台 UPFC 时所带来的目标函数离散的问题;文献[5]通过 PSO 算法选址,提高了电压稳定性并减少了故障的发生;文献[6,7]采用 GA 算法选址,以提高系统稳态性为目标。不足之处在于容易陷入局部收敛,并且不够直观。还有部分文献采用非智能算法,文献[8]利用拉格朗日乘子法,以 UPFC 成本和线路网损为目标函数,考虑静态安全约束,提高了系统的负荷率,然而权重系数的选择缺少相关依据。文献[9-11]采用基于灵敏度的方法来进行 UPFC 选址,文献[9,10]提出了线路潮流性能指标,考虑了串联侧电压幅值和相角两个控制变量,分别求灵敏度进行选址,然而在缺少线

路最大传输功率数据时,灵敏度无法计算。文献[11]以负荷率为目标函数,同时考虑了串联侧电压幅值和相角对有功和无功的影响,求取了 4 组灵敏度值,精度比较高,但牺牲了计算速度。文中提出一种基于灵敏度的选址方法,建立了 UPFC 直流潮流下功率注入模型,缩减了控制变量的个数,使得灵敏度计算更为便捷,同时建立了有功潮流方差函数,通过最优潮流程序计算出线路的最优潮流,从而克服了线路数据不可知的问题。

1 直流潮流下 UPFC 功率注入模型

UPFC 接入线路后,稳态情况下,串联侧的变流器可以等效成一个串入线路的电压源,幅值和相角分表为 V_s 和 θ_s , 并联侧变流器可以等效成一个电流源,幅值为 I_c ,等效电路图如图 1 所示。

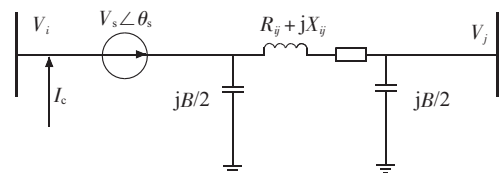


图 1 UPFC 等效电路

普遍使用的 UPFC 模型主要有电压源或电流源模型、功率注入模型、阻抗型模型和解耦型模型,其中注入功率模型具有对原网络参数无修改的优点,因此得到更多的推广。在常规潮流下,UPFC 的功率注入模型如图 2 所示。

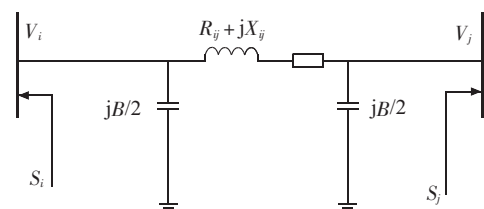


图 2 常规 UPFC 功率注入模型

根据功率注入法,UPFC 模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{S}_i &= \dot{V}_i [I_c - \dot{V}_s (y_{ij} + jB/2)]^* \\ \dot{S}_j &= \dot{V}_j (\dot{V}_s y_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

文献[9]基于以上表达式,对 V_s 和 θ_s 进行分别求偏导,得到这2个变量的灵敏度,从而进行UPFC的选址。但式(1)展开之后比较复杂,计算灵敏度时不方便。为了方便地求解灵敏度,从而更快地选址,建立以下直流潮流下的UPFC数学模型。

直流潮流适用于静态安全分析等需进行大量计算、又对计算速度要求高的场合。电力系统是个庞大的系统,在这样一个大系统中进行UPFC选址,选址速度是很重要的。同时安装UPFC主要是为了调节线路上的潮流,尤其是有功功率,由此可以采用直流潮流算法进行分析。由文献[12],直流潮流的情况下,接入UPFC对原线路的影响相当于串入了一个可控电源(如图3所示),通过控制其大小来调节线路有功潮流。

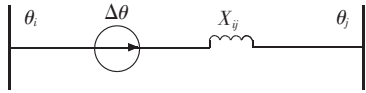


图3 UPFC简化模型

$\Delta\theta$ 的物理意义可以从图4得到。UPFC串联侧注入的电压可能的变化轨迹为图4所示的圆形以及内部的区域,由于注入电压的幅值相对于母线电压不大,即 $V_i \approx V_m$,随着注入电压的变化,母线 i 和母线 j 之间的夹角也随着改变,如果把母线 i 和UPFC看作一个整体考虑,UPFC的作用相当于改变着母线 i 的相角,从而改变线路两端的相角差,影响着线路的有功潮流。

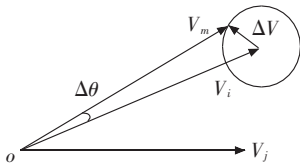


图4 的物理意义

由于线路串入了一个等效电源 $\Delta\theta$,改变了原电路的结构,不能进行常规的直流潮流计算,这里将 $\Delta\theta$ 等值成注入到两端母线的功率 P_i, P_j ,从而将UPFC对线路的影响率等效成对UPFC安装支路两侧母线的注入功率的影响。得到图5所示的直流潮流下的UPFC功率注入模型。

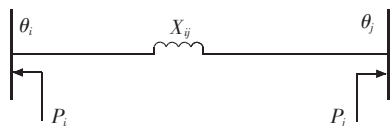


图5 直流潮流下UPFC注入功率模型

通过电路基本理论可以得到:

$$P_i = -\frac{\Delta\theta}{x_{ij}}, P_j = \frac{\Delta\theta}{x_{ij}} \quad (2)$$

由式(2),等效的注入功率是 $\Delta\theta$ 的一次函数,形式简

单,大大减少了灵敏度求解的计算量。同时还可以发现 $P_i + P_j = 0$,这也体现了UPFC只是改变潮流分布,而不会产生功率的工作原理。

2 UPFC 安装位置的选择

文中采用基于灵敏度计算的方法对UPFC安装位置进行选择,总体思路为:首先建立一个目标函数,用来衡量网络潮流分布优劣;其次计算不同位置UPFC控制参数对目标函数的灵敏度,该灵敏度反映了UPFC在不同位置时对网络潮流分布影响的强弱;最后,某条线路的灵敏度越大,则UPFC安装在这条线路时对潮流的调节能力越强,更容易使潮流的分布达到最优。

UPFC的安装原则^[10]:

- (1) 同一母线或支路最多安装一个UPFC元件。
- (2) 当传输线的阻抗相对较小(传输线较短)时,此支路无需安装UPFC元件。
- (3) 当支路可由发电机或同步调相机方便地进行功率调节时,此支路无需安装UPFC元件。

2.1 目标函数的建立

建立如下的有功潮流方差函数:

$$PI = \sum_{m=1}^{N_l} \frac{\omega_m}{2} (P_{lm} - P_{lm}^{opf})^2 \quad (3)$$

式中: P_{lm} 为支路上的有功功率; P_{lm}^{opf} 为最优潮流计算得到的支路有功功率; ω_m 为反应支路重要性的系数; N_l 为系统的总支路数。这里采用最优潮流作为线路有功潮流的参考值,通过与最优潮流的方差来评价网络有功潮流分布的合理性,指标越小说明潮流分布越合理。在不同线路安装UPFC时,进行UPFC控制变量对该目标函数的灵敏度计算。

2.2 灵敏度计算

在直流潮流下,加装UPFC的线路模型如图3所示,可以看到目标函数为 $\Delta\theta$ 的函数,则对目标函数 PI 求导,就可以得到灵敏度,利用灵敏度值绝对值的大小来确定UPFC的安装位置。灵敏度计算的过程如下:

当支路 m 为安装UPFC的支路时,则目标函数对 $\Delta\theta$ 的灵敏度:

$$c_m = \left. \frac{dPI}{d\Delta\theta} \right|_{\Delta\theta=0} \quad (4)$$

由式(2)得:

$$\frac{dPI}{d\Delta\theta} = \frac{\partial PI}{\partial P_i} \frac{dP_i}{d\Delta\theta} + \frac{\partial PI}{\partial P_j} \frac{dP_j}{d\Delta\theta} = \frac{1}{x_{ij}} \left(\frac{\partial PI}{\partial P_i} - \frac{\partial PI}{\partial P_j} \right) \quad (5)$$

因为:

$$\left. \frac{\partial PI}{\partial P_i} \right|_{\Delta\theta=0} = \sum_{m=1}^{N_l} \omega_m (P_{lm} - P_{lm}^{opf}) \left. \frac{\partial P_{lm}}{\partial P_i} \right|_{\Delta\theta=0}$$

且在直流潮流中:

$$P_{lm} = \frac{\theta_{m1} - \theta_{m2}}{x_m}, \theta = X \cdot P$$

$$\frac{\partial P_{lm}}{\partial P_i} = \frac{1}{x_m} \left(\frac{\partial \theta_{m1}}{\partial P_i} - \frac{\partial \theta_{m2}}{\partial P_i} \right) = \frac{1}{x_m} [x_{(m1,i)} - x_{(m2,i)}] \quad (6)$$

式中: $x_{(m1,i)}$, $x_{(m2,i)}$ 分别为电抗矩阵 X 中第 $m1$ 行,第 i 列元素和第 $m2$ 行,第 i 列元素。同理可得到 $\frac{\partial P_l}{\partial P_j}$ 。通过

联立求解式(2—6)就可以解出灵敏度值。

2.3 UPFC 选址方法流程

首先,获取系统的基础参数(线路电抗,发电机出力,变压器变比,负荷);其次,根据安装基本原则,对系统UPFC的安装线路进行初步的筛选;再次,通过式(2—6)对各个备选支路进行灵敏度计算;最后,比较各个备选支路的灵敏度大小,确定UPFC安装支路。UPFC选址流程如图6所示。

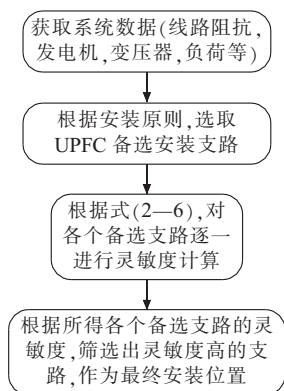


图6 UPFC 选址流程

3 算例研究

在IEEE14节点系统上进行UPFC选址,系统接线如图7所示。

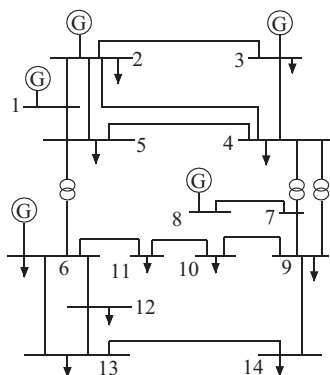


图7 IEEE14节点系统接线

满足以上条件的支路如下:9-10、9-14、10-11、12-13、13-14。考虑到实际系统运行时负荷率总处在波动状态,这里考虑负荷率分别为0.5、0.8、1、1.2等4种情况。根据前文算法在matlab中编程,计算结果见表(1—4)。

表1 负荷率为1时各个备选支路的灵敏度

支路号	UPFC 添加支路	灵敏度 c
13	9-10	19.15
17	9-14	8.01
18	10-11	10.80
19	12-13	-2.41
20	13-14	-7.34

表2 负荷率为0.5时各个备选支路的灵敏度

支路号	UPFC 添加支路	灵敏度 c
13	9-10	-1.85
17	9-14	0.24
18	10-11	0.85
19	12-13	0.23
20	13-14	-0.59

表3 负荷率为0.8时各个备选支路的灵敏度

支路号	UPFC 添加支路	灵敏度 c
13	9-10	-0.29
17	9-14	0.24
18	10-11	0.50
19	12-13	0.06
20	13-14	-0.33

表4 负荷率为1.2时各个备选支路的灵敏度

支路号	UPFC 添加支路	灵敏度 c
13	9-10	34.50
17	9-14	14.20
18	10-11	18.98
19	12-13	-4.43
20	13-14	-12.92

从以上结果可以看到,负荷率为0.5、1、1.2时,UPFC安装在支路9-10时,灵敏度绝对值最大;负荷率为0.8时,支路10-11灵敏度绝对值最大。显然安装在支路9-10能够适应的情况更多,同时即使灵敏度不是最大,但在所有备选线路中还是比较高的。因此选择支路9-10作为UPFC的安装位置,此时UPFC更有能力使线路潮流达到最优值。

4 结束语

UPFC安装位置的选择关系到UPFC功能的实现,提出一种基于灵敏度选址的选址方法,在UPFC的直流潮流功率注入模型的基础上,建立有功潮流方差函数来衡量系统潮流分布的合理性,该方法在灵敏度计算上,只需要计算一个变量的灵敏度,计算方法简单,编程容易。通过一个典型算例的计算,验证了该方法的准确性。文中提出的方法也适用于大型电网的UPFC选址的场合,可以减少计算量,提高计算效率,具有良好的使用价值。

参考文献:

- [1] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems [M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [2] 唐爱红. 统一潮流控制器运行特性及其控制的仿真和实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [3] BHOWMIK A R, CHAKRABORTY A K, Das P. Optimal Location of UPFC based on PSO Algorithm Considering Active Power Loss minimization [C]//Power India Conference 2012 IEEE Fifth. Murthal: IEEE, 2012: 1-5.
- [4] 马明. 计及 UPFC 的潮流计算和优化布点[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [5] AMELI M T, HASHEMI S. Optimal Location of UPFC for Enhancing Voltage Security and Relieving Congestion Using Particle Swarm Optimization [C]//Circuits, Communications and System (PACCS), 2010 Second Pacific-Asia Conference on. IEEE, 2010: 429-433.
- [6] ARABKHABURI D, KAZEMI A, YARI M, et al. Optimal Placement of UPFC in Power Systems Using Genetic Algorithm [C]//Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on. Mumbai: IEEE, 2006: 1694-1699.
- [7] KAZEMI A, ARABKHABORI D, YARI M, et al. Optimal Location of UPFC in Power Systems for Increasing Loadability by Genetic Algorithm [C]//Universities Power Engineering Conference 2006, UPEC'06 Proceedings of the 41st International. Newcastle upon Tyne: IEEE, 2006: 774-779.
- [8] FANG W L, NGAN H W. Optimising Location of Unified Power Flow Controllers Using the Method of Augmented Lagrange Multipliers [J]. IEE Proceedings. Generation Transmission and Distribution, 1999, 146(5): 428-434.
- [9] 刘新, 姚蜀军, 韩民晓, 等. 统一潮流控制器 (UPFC) 装置选址和定容研究 [C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集 (上册), 2008.
- [10] 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.
- [11] SINGH S N, ERLICH I. Locating Unified Power Flow Controller for Enhancing Power System Loadability [C]//Future Power Systems, 2005 International Conference on. Amsterdam: IEEE, 2005: 5-10.
- [12] 倪晖, 何仰赞. UPFC 最优布点问题研究 [J]. 华中电力, 1998, 11(3): 1-4.

作者简介:

周正宇(1992), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行控制;

王海潜(1963), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电力系统规划及可靠性研究工作;

祁万春(1979), 男, 江苏建湖人, 高级工程师, 从事电力系统规划和可靠性研究工作;

吴熙(1987), 男, 江苏靖江人, 副研究员, 主要研究方向为电力系统运行控制。

Optimal UPFC Locating Based on Sensitivity Analysis

ZHOU Zhengyu¹, WANG Haiqian², QI Wanchun², WU Xi¹

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2.Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: UPFC (Unified Power Flow Controller) has strong capability in power flow control; but the location of UPFC affects the power flow control a lot. This paper selects UPFC location using sensitivity analysis. Firstly, establishing UPFC power injection model under DC power flow reduce the number of control variables. Secondly, defining the active power flow variance function reflect how the grid be affected by UPFC. Thirdly, using the method of sensitivity analyze each candidate line, and then obtain the sensitivity of control variables and determine the location of UPFC. At last, by calculating in the IEEE14 network, the accuracy of this method can be verified. This method is convenient and improves the computational efficiency, especially in the large-scale power system.

Key words: UPFC; sensitivity; optimal location; active power flow variance function

(上接第 32 页)

作者简介:

施焯(1988), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向为分布式发电与微网、电能质量分析与控制;

吴在军(1975), 男, 江苏南京人, 博士生导师, 研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量分析与控制;

阚沁怡(1993), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与电能质量。

A Current Controller for LCL Inverter Based on Improved Kalman Filter

SHI Ye, WU Zaijun, KAN Qinyi

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: After reviewing the existing current control methods for inverters, an improved Kalman Filter based current control method is proposed in this paper. In this method, the Kalman Filter kernel is applied to the PI controller in the orthogonal reference frame, which results in a sine current controller without steady error. To improve the dynamic of the proposed current controller, the inverter current tracking error is feedforwarded to the forecast error variance matrix. The simulation results show that the proposed current control method has a good response speed and tracking accuracy.

Key words: inner current control loop; kalman filter; LCL inverter