

使用灵敏度因子优化 UPFC 布点

孙荣富

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在现代电力系统中,统一潮流控制器(UPFC)是调节电压和潮流的有效手段。在实际项目执行阶段 UPFC 的安装地点问题显得尤为重要。目前存在的布点方案没有考虑输电线路阻塞对布点结果的影响。该文引入线路有功潮流性能指数的概念,考虑了线路实际潮流与额定值的相对大小关系,采用有功过负荷的严重程度作为指标,根据 UPFC 参数对其产生影响的灵敏度因子大小来确定最佳安装地点。经算例验证,该方法简便快速,准确可行。

关键词: UPFC 布点; 线路有功潮流性能指数; 灵敏度因子

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)22-0001-03

0 引言

统一潮流控制器集串联补偿、并联补偿、移相调节等诸多功能于一身,它的应用可提高系统的可控性和鲁棒性,实现潮流可调,阻尼振荡,增强事故支援能力。

UPFC 具有调节线路有功、无功和节点电压的能力。实际中既需要考虑如何采用 UPFC 优化传输功率,还要考虑其安装地点的问题。文献[1]以总容量成本最小为目标,通过目标潮流寻求电力网络中的最优环路集,并以其中最佳的连支作为 UPFC 最佳安装地点。文献[2]在考虑系统和元件参数限制下,分析了 UPFC 串联注入电压幅值和相角对功率传输的影响,从而得出最佳安装地点。文献[3]把 UPFC 本身投资成本和安装后系统的有功损耗作为目标函数,用 BFGS 算法迭代出最优安装方案。

无论是垂直等级管理还是分类定价管理的输电系统,为了避免连锁崩溃导致的失负荷(由于输电线路热容量限制和系统稳定性限制而引起的阻塞只能持续很短的时间),可采取的对策通常有:装设 FACTS 设备、调节变压器分接头、重新分配发电机出力等。文献[2,3]以静态的观点分析了 UPFC 的布点方案,对于线路实际潮流与额定值之间的大小关系(即是否引起阻塞)我们不得而知,当出现阻塞的情况时上述方法可能会失去准确性。本文引入线路有功潮流性能指数的概念,充分考虑了线路实际潮流与额定值的相对大小关系,采用有功过负荷的严重程度作为指标,根据 UPFC 参数对其产生影响的灵敏度因子大小来确定最佳安装地点。

1 UPFC 的计算模型

由于 UPFC 的引入,输电线路的参数发生变化,潮流方程中将出现新的状态变量和约束条件,如安装 UPFC 的支路潮流等于整定值,并联换流器从系统中吸收的有功功率等于串联换流器注入系统的有功功率。UPFC 的建模可以将其并联控制和串联控制等效为电源模型,也有文献采用 UPFC 潮流计算的变压器模型和阻抗模型。本文将并联控制和串联控制分别等效为两个电流源和一个电压源^[4]。其等值电路图如图 1。

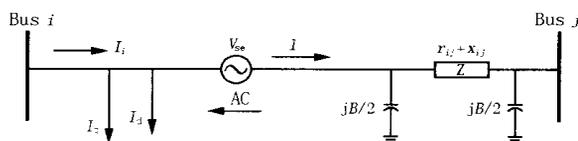


图 1 含 UPFC 支路等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of line with UPFC

通过等值电路可以看出,UPFC 有 3 个可控参数: V_{se} 、 ϕ_{se} 、 I_q 。 I_d 是与 V_i 同相角的电流分量,对应于 UPFC 内部的有功传递; I_q 是与 V_i 垂直的电流分量,对应于向节点 i 发出或吸收的无功。根据 UPFC 内部有功平衡,可得:

$$\text{Arg}(I_q) = \text{Arg}(V_i) \pm / 2$$

$$\text{Arg}(I_d) = \text{Arg}(V_i) \tag{1}$$

$$I_i = I_q + I_d + I \tag{2}$$

$$I_d V_i = \text{Re}[V_{se} I] \tag{3}$$

从公式(1)、(2)、(3)可知, V_{se} 、 ϕ_{se} 、 I_q 是能够表征 UPFC 特性的 3 个相互独立的控制变量^[3]。

支路 ij 上流过的功率可得:

$$S_{ij} = V_i (I_d + I_q + I)^* \quad (4)$$

$$S_{ji} = V_j (j V_j B/2 + j (V_i + V_{se}) B/2 - I)^* \quad (5)$$

比较可得安装 UPFC 后对节点 i 、 j 的附加功率:

$$P_i = V_{se}^2 g_{ij} + 2 V_i V_{se} g_{ij} \cos \phi_{se} - V_{se} V_j g_{ij} \cos (\phi_{se} + ij) - V_{se} V_j b_{ij} \sin (\phi_{se} + ij) - \frac{B_c}{2} V_i V_{se} \sin \phi_{se} \quad (6)$$

$$Q_i = V_i V_{se} g_{ij} \sin \phi_{se} - V_i V_{se} b_{ij} \cos \phi_{se} - \frac{B_c}{2} V_i V_{se} \cos \phi_{se} + V_i I_q \quad (7)$$

$$P_j = V_{se} V_j g_{ij} \cos (ij - \phi_{se}) - V_{se} V_j b_{ij} \sin (ij - \phi_{se}) \quad (8)$$

$$Q_j = V_{se} V_j g_{ij} \sin (ij - \phi_{se}) - V_{se} V_j b_{ij} \cos (ij - \phi_{se}) \quad (9)$$

2 UPFC 的安装地点

在正常或紧急事故情况下,系统负载的严重程度可以用线路有功潮流性能指数来表征^[6],其定义如下:

$$PI = \sum_{m=1}^{NL} \frac{w_m}{2n} \left(\frac{P_{lm}}{P_{lm}^{\max}} \right)^{2n} \quad (10)$$

式中: P_{lm} 是支路 m 上的有功潮流; P_{lm}^{\max} 是支路 m 的额定有功潮流; n 为指数系数; w_m 是反映支路 m 重要性的权重系数; NL 是系统的总支路数。这样定义的 PI 参数直观地把实际潮流与潮流极限相比较,从而包含了系统输电线路阻塞的信息,当实际电流大于极限值时,根据式(19)相应地反应到灵敏度系数中。

文献[5]使用直流潮流算法求出节点注入有功对支路有功潮流的影响系数矩阵。

$$= X P$$

根据其线性特性,有:

$$= X P \quad (11)$$

$$P_{ij} = (i - j) / x_{ij} \quad (12)$$

则节点 y 注入的有功对支路 m 有功(节点 i 流向节点 j) 影响的系数矩阵:

$$m_y = \frac{d}{d P_y} \left(\frac{i - j}{x_{lm}} \right) = \frac{1}{x_{lm}} \left(\frac{d}{d P_y} i - \frac{d}{d P_y} j \right) = \frac{x_{iy} - x_{jy}}{x_{lm}} \quad (13)$$

其中: x_{ik} , x_{jk} 是矩阵 X 的元素; x_{lm} 为支路 m 电抗。

当支路 m 为安装 UPFC 的线路时:

$$P_{lm} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^{NB} m_n P_n + P_s \quad (14)$$

当支路 m 没有安装 UPFC 时:

$$P_{lm} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^{NB} m_n P_n \quad (15)$$

式中:节点 s 为平衡节点; NB 为系统母线总数。

本文提出用 PI 对 3 个控制变量 V_{se} 、 ϕ_{se} 、 I_q 取偏导,得到 3 个控制灵敏度,利用灵敏度的大小指导确定 UPFC 的安装地点。则当支路 k 装有 UPFC 时,线路有功潮流性能指数对 UPFC 控制参数 X_k (V_{se} , ϕ_{se} , I_q) 的灵敏度系数:

$$C_1^k = \left. \frac{\partial PI}{\partial V_{se}} \right|_{V_{se}=0} \quad (16)$$

$$C_2^k = \left. \frac{\partial PI}{\partial \phi_{se}} \right|_{\phi_{se}=0} \quad (17)$$

$$C_3^k = \left. \frac{\partial PI}{\partial I_q} \right|_{I_q=0} \quad (18)$$

式中: c_1^k 、 c_2^k 、 c_3^k 值的大小分别对应 UPFC 的 3 个可控参数 V_{se} 、 ϕ_{se} 、 I_q 对线路有功潮流调节的有效性能指标。绝对值越大,越能有效地调节有功。

根据式(10)对 PI 的定义可得:

$$\frac{\partial PI}{\partial X_k} = \sum_{m=1}^{NL} w_m P_{lm}^{2n-1} \left(\frac{1}{P_{lm}^{\max}} \right)^{2n} \frac{\partial P_{lm}}{\partial X_k} \quad (19)$$

设支路 k 为安装了 UPFC 的线路, $m = k$, 根据式(14)、(15):

$$\frac{\partial P_{lm}}{\partial X_k} = \frac{\partial P_i}{\partial X_k} + \frac{\partial P_j}{\partial X_k} \quad (20)$$

$$\frac{\partial P_{lk}}{\partial X_k} = \frac{\partial P_i}{\partial X_k} + \frac{\partial P_j}{\partial X_k} + \frac{\partial P_j}{\partial X_k} \quad (21)$$

根据式(6)、(8)可求出 P_i 、 P_j 对控制参数 X_k 的偏导:

$$\left. \frac{\partial P_i}{\partial V_{se}} \right|_{V_{se}=0} = 2 V_i g_{ij} \cos \phi_{se} - V_j g_{ij} \cos (\phi_{se} + ij) - V_j b_{ij} \sin (\phi_{se} + ij) - \frac{B_c}{2} V_i \sin \phi_{se} \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial P_i}{\partial \phi_{se}} \right|_{\phi_{se}=0} = V_{se} V_j g_{ij} \sin ij - V_{se} V_j b_{ij} \cos ij - \frac{B_c}{2} V_{se} V_i \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial P_i}{\partial I_q} \right|_{I_q=0} = 0 \quad (24)$$

$$\left. \frac{\partial P_j}{\partial V_{se}} \right|_{V_{se}=0} = - V_j g_{ij} \cos (ij - \phi_{se}) - V_j b_{ij} \sin (ij - \phi_{se}) \quad (25)$$

$$\left. \frac{\partial P_j}{\partial \phi_{se}} \right|_{\phi_{se}=0} = - V_{se} V_j g_{ij} \sin ij + V_{se} V_j b_{ij} \cos ij \quad (26)$$

$$\left. \frac{\partial P_j}{\partial I_q} \right|_{I_q=0} = 0 \quad (27)$$

这样由式(13)~(27),可求得灵敏度因子 c_1^k, c_2^k, c_3^k 。通过不同安装地点的灵敏度因子的大小来判断最优的 UPFC 安装方案。

3 算例分析

采用电力系统 IEEE 14 节点系统,如图 2。

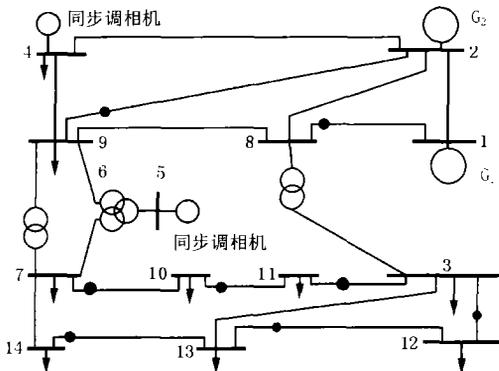


图 2 IEEE 14 节点系统(黑点为 UPFC 候选安装支路)
Fig.2 IEEE 14-bus system (maculas are UPFC candidates)

步骤一:UPFC 安装支路的初步选择。

- 1) 同一母线或同一支路上最多安装一个 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。

根据以上原则,选择 8 条支路安装 UPFC 的初步方案。

步骤二:计算灵敏度系数,确定最佳安装地点。

- 1) 根据节点导纳矩阵 Y ,求出直流潮流法的系数矩阵 B_0 ,再求其逆阵得到式(11)的矩阵 X 。
- 2) 根据式(13)求出系数矩阵。
- 3) 根据式(13)~(27),可求得灵敏度因子 c_1^k ,

表 1 各支路灵敏度系数计算值

Tab.1 Calculating results of sensitivity factors in each branches

支路 k	实际 潮流	额定 值	灵敏度因子		
			c_1^k	c_2^k	c_3^k
1-8	1.145	1.5	2.273	6.672	0
2-9	0.977	1.5	-0.711	-0.487	0
7-10	0.132	0.5	-1.407	-29.614	0
13-14	0.214	0.5	-0.351	-9.810	0
12-13	0.021	0.5	0.500	-1.597	0
3-12	0.213	0.5	1.183	-8.385	0
3-11	0.544	1.5	1.118	-6.402	0
10-11	0.035	0.5	0.699	-5.559	0

c_2^k, c_3^k 。见表 1。

本算例中式(10), $n=2, w_m=1, 2$ 。

从表 1 可以看出: 并联侧换流器的与母线电压垂直方向的分量 I_q 对线路潮流的影响很小; 比较 c_1^k, c_2^k 可知,电压幅值对本文的 PI 影响不太明显。除了支路 2-9 区域支路上灵敏度系数 $|c_1^k| < |c_2^k|$ 。考虑串联电压幅值对系统潮流的优化,线路 1-8 为最佳选择 ($c_1^k=2.273$);当串联电压与规定方向相反时,选择在支路 7-10 上安装 ($c_1^k=-1.407$);考虑串联电压相角的影响时,支路 7-10 为最佳选择 ($c_2^k=-29.614$)。同时,由于 V_{se} 控制范围的有限性, ϕ_{se} 对线路阻塞的控制比 V_{se} 更有效。综合考虑,在支路 1-8、7-10 上装 UPFC 为最佳选择。

4 结论

本文提出一种基于直流潮流模型灵敏度系数判别法来选择 UPFC 的最佳安装地点,经算例验证是正确可行的。相比较文献[3],该方法简便快速,同时可根据灵敏度大小确定多个可行的候选支路,从中选择最佳安装方案。

参考文献:

- [1] 倪辉,何仰赞(NI Hui, HE Yang-zan). UPFC 最优布点问题研究(Analysis of Optimizing Location of UPFC) [J]. 华中电力(Central China Electric Power), 1998, (3): 1-4.
- [2] Cai H, Qu Z, Gan D. Determination of the Power Transfer Capacity of a UPFC with Consideration of the System and Equipment Constraints and of Installation Locations [A]. IEE Proc Part - C, Generation, Transmission and Distribution, 2002, (1): 114-120.
- [3] Fang WL, Ngan H W. Optimising Location of Unified Power Flow Controllers Using the Method of Augmented Lagrange Multipliers [A]. IEE Proc Part - C, Generation, Transmission and Distribution, 1999, (5): 428-434.
- [4] 丁奇锋,张伯明(DING Qi-feng, ZHANG Bo-ming). EMS 中含 FACTS 元件的电力系统潮流分析(Power Analysis in EMS for the Power System with FACTS Devices) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(6): 39-42.
- [5] Wood A J, Wollenberg B F. Power Generation, Operation and Control [M]. New York: John Wiley, 1984.

(下转第 42 页 continued on page 42)

- [6] 周羽生,周有庆,戴正志(ZHOU Yu-sheng, ZHOU You-qing, DAI Zheng-zhi). 基于 FTU 的配电网故障区段判断算法(Algorithm for Fault Section Judgement in Power Distribution Network Based on FTU)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment),2000,20(4):25-27.
- [7] Talukdar S, Ramesh V C. A Multi-agent Technique for Contingency Constrained Optimal Power Flows[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(2):855-861.
- [8] Tomita Y, Fukui C, Kudo H, et al. A Cooperative Protection System with an Agent Model[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998,13(10):1060-1066.
- [9] Nagata T, Sasaki H. A Multi-agent Approach to Power Sys-

tem Restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(5):457-462.

收稿日期: 2004-03-12; 修回日期: 2004-06-16

作者简介:

刘淑萍(1979-),女,硕士研究生,研究方向为变电站综合自动化及微机保护;E-mail:1788P9465@sohu.com

韩正庆(1977-),男,博士研究生,研究方向为变电站综合自动化及微机保护;

高仕斌(1963-),男,教授,研究方向为牵引供电系统自动化、电力设备故障诊断。

Study on a scheme of fault disposing for distribution network based on MAS

LIU Shu-ping, HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on introducing the concept and characteristics of Agent and structure of multi-Agent, a scheme of fault disposing for distribution network based on MAS is proposed in this paper. The structure of the system, function and coordinated mode are introduced in detail. And the analysis shows that it can realize fault isolating and voltage restoration.

Key words: fault of distribution network; Multi-agent system; coordinated control

(上接第3页 continued from page 3)

- [6] Kim S H, Lim J U. Enhancement of Power System Security Level through the Power Flow Control of UPFC[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. 2000.1:38-43.

收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-07-02

作者简介:

孙荣富(1982-),男,硕士研究生,研究方向为灵活交流输电系统及其智能控制。E-mail:eric_sunf@163.com

Optimizing location of UPFC using sensitivity factors

SUN Rong-fu

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The unified power flow controller (UPFC) has been proved to be an effective means for regulating voltage and power flow in modern power systems. Optimizing its location becomes a key point in the practical implementation stage. Approaches at present haven't take the influence of transmission line congestion into account. This paper introduces the concept of line active power flow performance index, compares real-time power flow with its ratings and uses overload severity as the guideline, thus, optimizes location of UPFC by means of index sensitivities with respect to control parameters of UPFC. Case studies show that this approach is concise and feasible.

Key words: UPFC location; line active power flow performance index; sensitivity factors