

基于 PSAT 的 UPFC 电力系统潮流建模与仿真

胡 源, 张福生, 徐小林, 王硕禾

(石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:相对于传统的控制方法,统一潮流控制器(UPFC)的灵活控制可以更好地提高电网稳定性。为了能够更加深入地研究计及 UPFC 的电力系统潮流问题,采用在 PSAT 环境下进行仿真分析。提出了一种改进的功率注入模型进行潮流计算,以电力系统稳定性及电力市场经济性求解最优潮流。最后对 IEEE9 节点系统仿真,结果表明方法可行,采用 PSAT 分析具有较高的参考价值。

关键词:UPFC;最优潮流;PSAT

中图分类号:TM743 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)04-0073-05

0 引言

作为第三代灵活交流输电系统(FACTS)控制器 UPFC 集多种控制方式于一身,已成为处理潮流控制、提高电能质量等问题的最优方式之一^[1-2]。近年来 UPFC 技术的研究不断深入,随着基于模块化多电平换流(MMC)技术的 UPFC 在江苏 220 kV 电网系统中得到实际应用,更备受关注^[3]。计及 UPFC 的电力系统潮流计算以及多目标最优潮流(OPF)等问题建模与仿真的研究有十分重要的意义。

目前除了部分商业软件外,用于研究电力系统潮流计算的 Matlab 电力系统分析软件包有很多,但能够进行最优潮流计算的仅有 Matpower 与 PSAT,而 PSAT 除了具有 Matpower 的功能外添加了 GUI 模块,还具有更好的二次编程环境等功能,然而利用其进行潮流建模仿真的研究还比较少。文献[4]对 PSAT 处理电力系统分析问题进行了有效性验证。文献[5]介绍了 PSAT 在潮流计算中的应用,但未对计及 UPFC 的潮流计算进行深入研究。文献[6]介绍了 UPFC 潮流计算常用的功率注入模型,但在优化潮流过程中控制变量含有 UPFC 的可控参数,可能存在潮流不收敛的问题,同时未采用 PSAT,因而其仿真过程也较为复杂。文献[7]介绍了 PSAT 基于内点法的多目标最优潮流计算的处理方法,但在计及 UPFC 的情况下使用此方法会出现不支持静态分析的问题。在改进上述不足的基础上,在 PSAT 环境下解决计及 UPFC 的潮流计算优化以及以有功网损最小和静态稳定裕度最大为目标的最优潮流问题。通过对 IEEE9 节点系统仿真验证模型和算法的正确性和有效性。

1 UPFC 潮流计算方法

1.1 UPFC 系统基本结构

UPFC 的基本结构如图 1 所示^[2,8],它由两个变压器以及中间带有电容器(直流环节)的两个背靠背电压源型变流器组成。变流器 1 接输入端并联变压器支路,其作用是通过改变无功功率来稳定输入端电压,同时经直流环节为变流器 2 提供有功功率。变流器 2 通过一个串联线路变压器接入,其作用相当于串联一个电压源,通过

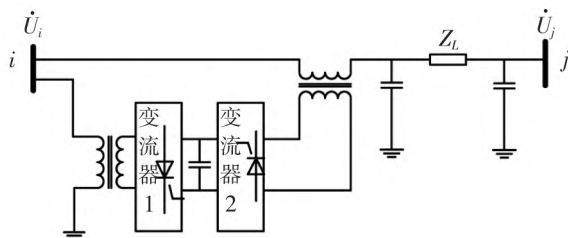


图 1 UPFC 基本结构

收稿日期:2016-08-24 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.04.14

作者简介:胡源(1991-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行控制。E-mail:2830399599@qq.com

胡源,张福生,徐小林,等.基于 PSAT 的 UPFC 电力系统潮流建模与仿真[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(4):73-77.

改变其幅值与相位实现 UPFC 控制潮流的功能。

1.2 一种改进的 UPFC 等效注入功率模型

当线路中加入 UPFC 装置时可用一个串联电压源 U_T 和一个并联电流源 I_Z 等效,其等效电路如图 2 所示。在此基础上,为了便于进行潮流计算建立的 UPFC 等效注入功率模型如图 3 所示。

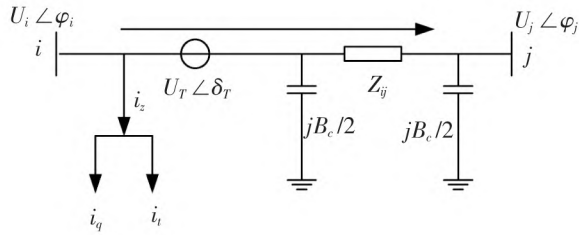


图 2 UPFC 等效电路图

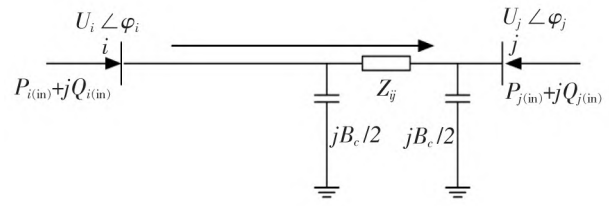


图 3 UPFC 等效注入功率模型图

在图 2 中等效电流源 I_Z 可以分解为与输入端电压 U_i 方向相同的有功分量 I_l 和与之正交的无功分量 I_q ,图 3 中等效注入功率模型中 UPFC 对电力系统潮流的控制主要由注入节点 i, j 的功率反映。其注入功率可参考文献[9],为了能够在使用 Matlab/PSAT 等仿真软件中对潮流的计算和优化中简化程序进一步推导为

$$\begin{cases} P_{i(in)} = U_j U_T [b_{ij} \sin(\varphi_j + \delta_T) - g_{ij} \cos(\varphi_j - \delta_T)] + 2U_i U_T (g_{ij} + B_c/2) \cos(\varphi_i - \delta_T) + U_T^2 g_{ij} \\ Q_{i(in)} = U_i U_T [g_{ij} \sin(\varphi_i - \delta_T) - (b_{ij} + B_c/2) \cos(\varphi_i - \delta_T)] - I_q U_i \\ P_{j(in)} = -U_j U_T [g_{ij} \cos(\varphi_j - \delta_T) + b_{ij} \sin(\varphi_j - \delta_T)] \\ Q_{j(in)} = -U_j U_T [g_{ij} \sin(\varphi_j - \delta_T) + b_{ij} \cos(\varphi_j - \delta_T)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{i(in)}, P_{j(in)}$ 分别为注入节点 i, j 的有功功率; $Q_{i(in)}, Q_{j(in)}$ 分别为注入节点 i, j 的无功功率; U_i, U_j, U_T 分别为节点 i, j 变压器的电压幅值; $\varphi_i, \varphi_j, \delta_T$ 为节点 i, j 变压器的电压相位; g_{ij}, b_{ij} 分别为线路 $i-j$ 的电导和电纳; B_c 为线路对地电纳; I_q 为等效电流源 I_l 的无功分量。

2 多目标最优潮流模型

2.1 目标函数

最优潮流模型的建立多以有功网损最小为目标,在多目标潮流优化的研究中在考虑经济利益的同时应保证电力系统的稳定性^[10-13]。建立的模型以系统有功网损最小,电压稳定裕度最大为目标函数,其中电压稳定裕度按照 PSAT 使用手册中的“最大负荷裕量参数”度量。即

$$\text{Min } L = \omega_1 \Delta P - \omega_2 \lambda_c \quad (2)$$

式中, ΔP 为系统有功损耗; λ_c 为最大负荷裕量参数; ω_1, ω_2 分别为系统有功损耗和最大负荷裕量参数的加权因子。

2.2 约束条件

2.2.1 等式约束

等式约束条件主要是系统中有功功率和无功功率保持平衡,即满足功率平衡方程。在装置 UPFC 的电力线路中应增加等效注入功率部分,即

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) + P_{i(in)} \\ Q_i = U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) + Q_{i(in)} \\ P_j = U_j \sum_{k=1}^n U_k (G_{jk} \cos \delta_{jk} + B_{jk} \sin \delta_{jk}) + P_{j(in)} \\ Q_j = U_j \sum_{k=1}^n U_k (G_{jk} \sin \delta_{jk} - B_{jk} \cos \delta_{jk}) + Q_{j(in)} \end{cases} \quad (3)$$

UPFC 模块是通过一个 POD 控制器控制变量 V_p 以及无功分量 I_q , 其设置参数中无功分量 I_q 上限为 3 p. u., 下限为 -1 p. u.; 等效串联电压源与线路电流同相位的电压分量的幅值 V_p 上下限为 ± 0.2 p. u., 超前线路电流 90° 的电压分量的幅值 V_q 上下限为 ± 0.2 p. u.; 串联补偿百分比设置为 30%; 控制器增益与时间常数分别设置为 75 p. u. 和 0.005 s。

系统未优化前的初始有功损耗为 0.034 7 p. u., 最大负荷裕量参数为 0.212 4, PSAT 中“OPF type”设置为 Pareto Set。表 1 中为进行最优潮流的求解, 给出了以下 5 个方案供决策者根据实际情况选择: 方案 1 是重点考虑经济利益, 以有功网损最小为目标进行优化计算, 再根据所求解中最大负荷裕量参数是否满足要求进一步确定; 方案 2 是重点保证系统电压稳定, 以最大负荷裕量参数 λ_c 尽可能大为目标进行优化计算; 方案 3 是两者综合考虑且以有功网损较最大负荷裕量参数稍微重要; 方案 4 是两者综合考虑且以最大负荷裕量参数较有功网损稍微重要; 方案 5 是两者同等重要。

表 1 Pareto 潮流优化方案

方案	权值	目标函数	
		$\Delta P/(p. u.)$	λ_c
1	$\omega_1=0.974, \omega_2=0.026$	0.029 8	0.154 4
2	$\omega_1=0.001, \omega_2=0.999$	0.032 5	0.210 8
3	$\omega_1=0.564, \omega_2=0.436$	0.030 6	0.179 1
4	$\omega_1=0.436, \omega_2=0.564$	0.031 7	0.194 3
5	$\omega_1=\omega_2=0.5$	0.031 2	0.182 8

图 5 为 PSAT 设置的权重因子 ω_2 与有功网损和最大负荷裕量参数 λ_c 的关系曲线。由于考虑了系统有功损耗与系统最大负荷裕量参数两个方面, 其中有功损耗单位为 p. u., 系统最大负荷裕量参数无单位。为使图像更加清晰, 将系统有功网损数值放大 7 倍并未改变网损减少的百分比, 不失一般性。所提方案将系统有功网损降低了 6.77%~14.12%, 通过对系统最大负荷参数的要求做进一步最优选择。在这里需要说明的是, 由于考虑经济性与稳定性两个方面, 其权值的分配可直接由决策者根据实际情况选取, 一般是在保证一定稳定性即系统最大负荷裕量参数的前提下保证最小的系统运行成本。

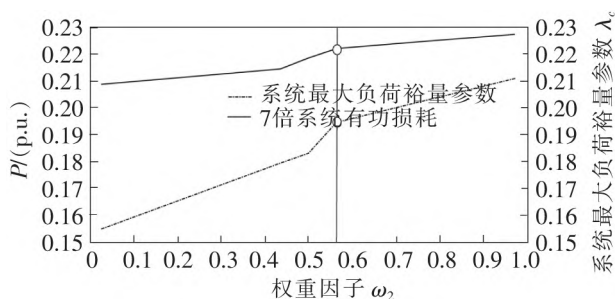


图 5 ω_2 与有功网损和最大负荷裕量参数 λ_c 的关系

4 结论

本文建立了一种改进的功率注入模型, 以系统有功网损最小及电压稳定裕度最大为目标进行了计及 UPFC 的潮流优化, 同时保证系统的安全性与经济性。PSAT 仿真过程较为简单, 在 IEEE9 节点系统中除了需要调节 UPFC 的控制变量外仅需调节加权因子 ω_2 即可实现, 同时考虑降低有功网损和提高稳定裕度的目的进行多目标的潮流优化, 具有一定参考价值。由于本文是针对影响因素加权由决策者可控的前提下进行潮流优化, 其仿真在 PSAT 中较为方便, 深入研究可在其 GAMS 模块中进行。同时在 UPFC 的多目标潮流优化中可引入智能算法、层次分析法等对两个尤其是两个以上的目标再做深入研究, 其结果与本文方法值得对比^[15]。

参 考 文 献

- [1] Son K M, Lasseter R H. A Newton-type current injection model of UPFC for studying low-frequency oscillations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 694-701.
- [2] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 204-232.
- [3] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.

- [4]常勇,徐政,王超. 基于 MATLAB 的电力系统分析工具包 PSAT 及其有效性检验[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 102-105.
- [5]SARUSSI D, RABINOVIVI R. Developing and analysis of power system using PSAT software [C]. IEEE, Israel, 2008: 31-35.
- [6]Venkatesh B, George M K. Fuzzy OPF incorporating UPFC[J]. IEEE Proc-Gener, Transm and Distrib, 2004, 151(5): 625-629.
- [7]彭春华,陈佳琰,仲晓春. 基于内点法的多目标 OPF 计算方法及其在 PSAT 软件中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(8): 35-39.
- [8]陈剑,李林川,张芳,等. 基于 PSASP 的 UPFC 潮流控制建模与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 66-70.
- [9]Hao J, Shi L B. Optimizing location of unified power flow controllers by means of improved evolutionary programming [J]. IEEE Proc-Gener, Transm, and Distrib. 2004, 151(6): 705-712.
- [10]Milano F, Canizares CA, Invernizzi M. Multiobjective optimization for pricing system security in electricity markets. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 596-604.
- [11]杨尚瑾. 统一潮流控制器(UPFC)多目标协调控制及稳定控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013.
- [12]郭建峰. 计及 FACTS 装置的最优无功补偿[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [13]仇志华. 基于 UPFC 的自愈配电环网及其潮流优化控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [14]Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. ISU: Ames, 1977.
- [15]孙银锋, 闫旭, 李泽财. 基于 NSGA-II 算法的多目标无功优化[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(1): 24-26.

Power Flow Modeling and Simulation of UPFC in Power System Based on PSAT

Hu Yuan, Zhang Fusheng, Xu Xiaolin, Wang Shuohe

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Compared with the traditional control methods, the unified power flow controller (UPFC) can improve the stability of power system. In order to get a deeper study of the power flow of UPFC and the power system, the simulation analysis is carried out in the PSAT environment. An improved power injection model is proposed to solve the power flow calculation for the optimal power flow considering the stability of the power system and the power market economy. Finally, the IEEE 9-bus system simulation is made and the results show that the method is feasible and analysis based on PSAT has a high reference value.

Key words: UPFC; OPF; PSAT