

考虑统一潮流控制器的电力系统状态估计算法

张海波¹, 沈茂亚²

(1. 江阴供电公司, 江苏 江阴 214400; 2 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 以统一潮流控制器 (UPFC) 为代表的灵活交流输电系统 (FACTS) 技术可以实现传输功率的合理分布、优化系统资源, 提高系统的稳定性和可靠性。基于加权最小绝对值 (WLAV) 估计准则, 将 UPFC 元件的作用等效为一系列电压和功率的约束, 并运用内点法进行状态估计计算。该方法可以完全完整考虑 UPFC 元件对系统运行状态的影响, 并能充分利用 WLAV 估计的抗差的特点, 提高估计的精度。IEEE-14 系统的算例仿真结果, 验证了所提出算法的有效可行性。

关键词: UPFC; 电力系统; WLAV; 状态估计

State estimation for power system with UPFCs

ZHANG Hai-bo¹, SHEN Mao-ya²

(1. Jiangyin Power Supply Company, Jiangyin 214400, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The technique of Flexible AC Transmission System (FACTS), especially Unified Power Flow Controller (UPFC), can be used to realize the reasonable distribution of power flow and optimization of system resources and improve the stability and reliability of the system. Based on estimate rule of WLAV, a way of transforming the effect of UPFCs to some restrictions of voltage and power flow is introduced into state estimation, which is calculated with Interior Point Method. The model and solution could consider the effects of UPFCs to power system completely and enhance the precision of estimation by using the characters of WLAV. The results of simulation in IEEE-14 system indicate that the proposed algorithm is effective and feasible.

Key words: UPFC; power system; WLAV; state estimation

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0029-04

0 引言

随着电力系统的发展, 电网结构日益复杂, 互联电力系统规模不断扩大; 另外, 由于电力市场的逐步形成, 电力行业面临的竞争加剧。因此, 为了保证电力系统安全稳定运行, 对现代能量管理系统 (EMS) 提出了更高的要求^[1]。作为电力电子技术和现代控制技术相结合的产物, FACTS 技术可以实现传输功率的合理分布、优化系统资源, 提高系统的稳定性和可靠性^[2]。其中, UPFC 元件由于集串并联补偿、移相等功能为一体, 受到了研究人员的普遍关注^[3,4]。

常用的 UPFC 的等值模型包括一个串联和并联的电压源, 可以独立改变线路的电压幅值和线路潮流^[4]。并且, 该模型包含了其参数和运行约束。因此, 可以把状态估计问题描述为一个带有约束的优化问题, 并应用内点法进行计算^[5]。文献[6]通过利

用 UPFC 功率注入模型, 对相关的量测函数和雅可比矩阵元素函数进行修正, 从而在传统 WLS 状态估计模型基础上得到了计及 UPFC 的电力系统状态估计模型。本文提出了一种基于内点法考虑 UPFC 元件的电力系统 WLAV 状态估计算法。该算法可以完整地考虑 UPFC 元件的运行约束及其对电力系统状态的影响, 并能充分利用 WLAV 估计的抗差特点, 提高估计的精度。IEEE-14 系统算例仿真结果验证了本文算法的有效性。

1 考虑 UPFC 的电力系统 WLAV 状态估计

1.1 UPFC 稳态等值模型

目前已经提出来的 UPFC 稳态等值模型有多种, 如阻抗模型、节点等效注入功率模型及通用的电压源模型^[7]。由于 UPFC 在稳态运行时主要作用是控制电压和潮流分布, 因此本文采用 UPFC 电压源模型, 该模型由一个串联和并联的电压源及等效

电抗组成。若有线路 k-m，在 k 节点安装 UPFC 组件，其等值模型如图 1 所示。

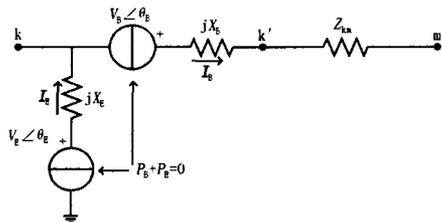


图 1 UPFC 及其安装线路的等值模型

Fig.1 Equivalent circuit model of the line with UPFC

注意到图 1 中有等式约束 $P_B + P_E = 0$ ，意味着 UPFC 和系统并没有有功功率的交流。其中， P_B 和 P_E 分别为电压源的有功输出。因此，这两个电压源的运行是相互影响的。参数 X_E 、 X_B 和 Z_{km} 分别为两个电压源的内电抗和线路的阻抗。

线路 k-m 的首端和末端潮流公式如下：

$$\begin{aligned} S_{km} &= V_k \cdot I_{km} \\ S_{mk} &= V_m \cdot I_{mk} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{其中: } I_{km} = -I_{mk} = \frac{V_k + V_B - V_m}{Z_{km} + jX_B} \quad (2)$$

式中： V_k 、 V_m 分别为节点 k 和 m 的复电压； I_{km} 为线路从节点 k 到 m 的复电流， I_{mk} 为线路从节点 m 到 k 的复电流； V_B 、 V_E 分别为两个电压源的复电压，均为 UPFC 的变量。

两个电压源的输出功率计算公式如下：

$$\begin{aligned} S_B &= V_B \cdot V_B \\ S_E &= V_E \cdot I_E \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中: } I_B = I_{km} = \frac{V_k + V_E - V_m}{Z_{km} + jX_B} \quad (4)$$

$$I_E = \frac{V_E - V_k}{jX_E} \quad (5)$$

系统考虑 UPFC 后就必须考虑以下这些约束：

$$\begin{cases} P_B + P_E = 0 \\ S_E < S_{E, \max} \\ S_B < S_{B, \max} \\ V_E < V_{E, \max} \\ V_B < V_{B, \max} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $S_{E, \max}$ 和 $S_{B, \max}$ 分别为两个电压源的功率输出上限， $V_{E, \max}$ 和 $V_{B, \max}$ 分别两个电压源电压的上限。

1.2 状态估计算法

带有等式和不等式约束的 WLAV 状态估计问题在文献[8]中已有描述，考虑 UPFC 组件后，其问

题模型可描述如下：

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m w_i r_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} g(x) = 0 \\ r - z + h(x) = 0 \\ f(x) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： w_i 和 r_i 分别为第 i 个量测的权重和残差， z 为量测向量， $h(x)$ 为根据网络分析得到的非线性量测函数， r 为量测残差向量，均为 m 维向量； x 为状态向量，对 n 节点系统为 $2n-1$ 维； $g(x)$ 为等式约束，包括零注入平衡和式 (6) 中 UPFC 约束的等式部分，记为 g 维； $f(x)$ 为不等式约束，包括发电机无功出力限制、变压器分接头限制以及式 (6) 给出的 UPFC 不等式约束部分，记为 f 维。

由以上分析可知，WLAV 状态估计问题是一个典型的非线性规划问题。用原--对偶内点法进行求解时，首先需要将不等式约束转化为等式约束，并引入障碍函数。为此，引入松弛变量 s ($s \geq 0$) 和障碍参数 μ ($\mu > 0$)，把式 (7) 中的不等式约束转化为等式约束，并把目标函数改造为障碍函数，可以得到：

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^m w_i r_i - m \sum_{k=1}^f \ln s_k \\ \text{s.t.} & \begin{cases} g(x) = 0 \\ r - z + h(x) = 0 \\ f(x) + s = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

当搜索点靠近最优点时，障碍参数 $\mu \rightarrow 0$ 。式 (8) 为含有等式约束的优化问题，可以利用 Lagrangian 乘子法直接进行求解。其 Lagrangian 函数为：

$$L = \sum_{i=1}^m w_i r_i - \mu \sum_{k=1}^f \ln s_k - \lambda^T [f(x) + s] - \rho^T g(x) - \omega^T [r - z + h(x)] \quad (9)$$

应用 KKT 最优条件有：

$$\begin{cases} L_s \equiv -\mu S^{-1} e - \lambda = 0 \\ L_\lambda \equiv -f(x) - s = 0 \\ L_\rho \equiv -g(x) = 0 \\ L_\omega \equiv -r + z - h(x) = 0 \\ L_r \equiv -R^{-1} e - \omega = 0 \\ L_x \equiv -\nabla f(x) \lambda - \nabla g(x) \rho - \nabla h(x) \omega = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： S 为对角矩阵，其第 k 个对角元素为 s_k ； $\nabla f(x)$ 、 $\nabla g(x)$ 和 $\nabla h(x)$ 分别为 $f(x)$ 、 $g(x)$ 和 $h(x)$ 的雅克比矩阵； R 为对角矩阵，其第 k 个对角元素为 $1/w_k$ ； e 为所有元素都为 1.0 的常向量。

用牛顿法求解上述 KKT 方程，可以获得如下

的转移方向:

$$\begin{cases} L_{s_0} = \mu S^{-2} \Delta s + \Delta \lambda \\ L_{\lambda_0} = \nabla f(x) \Delta x + \Delta s \\ L_{p_0} = \nabla g(x) \Delta x \\ L_{\omega_0} = \Delta r + \nabla h(x) \Delta x \\ L_{\omega} = \Delta \omega \\ L_{x_0} = [\nabla^2 f(x) \lambda + \nabla^2 g(x) \rho + \nabla^2 h(x) \omega] \Delta x + \\ \nabla f(x) \Delta \lambda + \nabla g(x) \Delta \rho + \nabla h(x) \Delta \omega \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $(L_{s_0}, L_{\lambda_0}, L_{p_0}, L_{\omega_0}, L_{\omega}, L_{x_0})$ 为摄动 KKT 方程在展开点的值; $\nabla^2 f(x), \nabla^2 h(x), \nabla^2 g(x)$ 分别为 $f(x), h(x), g(x)$ 的海森矩阵。

获得转移方向后, 即可移动到新方向, 更新解向量:

$$\begin{cases} s^{k+1} = s^k + \alpha_p \cdot \Delta s^k \\ r^{k+1} = r^k + \alpha_p \cdot \Delta r^k \\ x^{k+1} = x^k + \alpha_p \cdot \Delta x^k \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha_d \cdot \Delta \lambda^k \\ \rho^{k+1} = \rho^k + \alpha_d \cdot \Delta \rho^k \\ \omega^{k+1} = \omega^k + \alpha_d \cdot \Delta \omega^k \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: α_p 和 α_d 为步长因子:

$$\begin{cases} \alpha_p = 0.9995 \min\left(\frac{-s_i}{\Delta s_i}, 1\right) \\ \alpha_d = 0.9995 \min\left(\frac{-\lambda_i}{\Delta \lambda_i}, 1\right) \end{cases} \quad (13)$$

($i=1, 2, \dots, f$)

上式的取值可以保证向量 x^k 在可行域中, 由此使得 $f(x) \leq 0, \lambda \leq 0$ 。

由式(6)可知, 系统中含有 UPFC 元件后, 系统的运行就增加了部分等式和不等式约束。因此, 在建模时考虑这些约束条件就完全可以使得 UPFC 元件的注入潮流和期望潮流拥有零残差。这就保证了利用 UPFC 元件可以精确地控制潮流的流动方向。

2 算法中的几个问题及其实现

2.1 计算速度的提高

原对偶内点法中, 影响计算速度的主要因素是修正方程式的求解。为了提高计算速度, 本文一方面对式(12)进行行列互换并分解, 形成了两个完全解偶的子方程, 大大减少了运算量; 另一方面,

算法中涉及到的大量矩阵都是稀疏阵和对角阵, 因此在算法实现中采用十字链表稀疏技术极大地提高了计算速度。

2.2 初始化

由式(7)知, 状态量 x^0 应该满足 $f(x^0) < 0$, 所以, 所有节点电压幅值都初始化为 1.0, 相角都初始化为 0.0。UPFC 元件的控制变量的设置如下: 假设初始时 UPFC 没有运行, 也就是说, 所有并联电压源初始化为 1.0, 即 $V_E = 1.0, \theta_E = 0.0$; 所有串联电压源均初始化为 0.0, 即 $V_B = 0.0, \theta_B = 0.0$ 。障碍参数 μ 初始化为 1.0, 并且在迭代过程中随着迭代次数与对偶间隙成比例。

2.3 障碍参数的调整

在收敛到最优点时, 障碍参数 μ 应该为 0, 这样才能保证松弛补偿条件, 所以在迭代过程中, 障碍参数 μ 必须要逐步减小。本文利用对偶间隙来调整障碍参数 μ 。对偶间隙表达如下:

$$\delta = \lambda^T f(x) + \rho^T g(x) + \omega^T [r - z + h(x)] \quad (14)$$

对偶间隙 δ 应该保持非负, 且在最优点时收敛为 0。因此, 在迭代过程中, 障碍参数 μ 可以调整如下^[9]:

$$\mu = \delta / (2n - 1)^2 \quad (15)$$

式中: n 为系统的节点数。

2.4 算法流程

计及 UPFC 的电力系统状态估计算法具体流程如下:

Step 1: 输入网络参数及量测数据;

Step 2: 按照 2.2 所述准则进行初始化, 并给出收敛标准 $\varepsilon = 10^{-3}$;

Step 3: 按照式(14)进行对偶间隙计算: 若 $\delta < \varepsilon$, 结束计算, 否则继续;

Step 4: 按照式(15)进行障碍参数计算;

Step 5: 形成修正方程并求解偏移量;

Step 6: 通过式(13)进行原步长和对偶步长的选择;

Step 7: 按照式(12)进行偏移量的修正, 转 Step 3。

3 算例仿真研究

为了验证本文所提出的方法的有效性, 将该算法应用于修改后的 IEEE-14 系统。图 2 为含 UPFC 的 IEEE-14 系统网络图。其中, UPFC 元件安装在线路 6-12 靠近 6 号节点的一侧; UPFC 的电压和功率约束如表 1 所示。

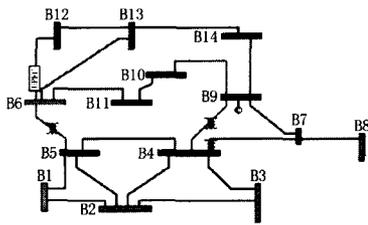


图 2 含 UPFC 的 IEEE-14 系统网络图

Fig.2 Modified IEEE-14 system including one UPFC

表 1 系统所含 UPFC 元件参数

Tab.1 Parameters and constraints of UPFCs in IEEE-14

X_B	X_E	$X_{B,max}$	$X_{E,max}$	$S_{B,max}$	$S_{E,max}$
0.05	0.05	1.10	1.10	0.44	0.44

程序用 C++ 语言实现, 运行于 1.72 GHz, 256 MB 内存的 PC 机上。程序中各种参数的设置如前所述。量测数据由潮流结果和正态分布的随机误差叠加形成。算例中选用了 47 个量测数据, 如表 2 所示。

表 2 IEEE-14 量测数据表

Tab.2 Measurements data in IEEE-14 system

测点号	量测项目	量测值	测点号	量测项目	量测值
1	V_1	1.0676	25	Q_{13-14}	0.0389
2	V_2	1.0458	26	P_{12-6}	-0.1852
3	V_3	1.0056	27	Q_{12-6}	-0.0279
4	V_6	1.0726	28	P_{9-7}	-0.2828
5	V_8	1.0908	29	Q_{9-7}	-0.1541
6	P_{1-2}	1.5709	30	P_3	-0.9410
7	Q_{1-2}	-0.2056	31	Q_3	0.0342
8	P_{2-3}	0.7412	32	P_5	-0.0989
9	Q_{2-3}	0.0382	33	Q_5	-0.0126
10	P_{4-7}	0.2800	34	P_6	-0.1173
11	Q_{4-7}	-0.0169	35	Q_6	-0.0389
12	P_{6-11}	0.0628	36	P_8	0.0027
13	Q_{6-11}	0.0683	37	Q_8	0.0176
14	P_{6-12}	0.1976	38	P_9	-0.2915
15	Q_{6-12}	0.0230	39	Q_9	-0.1710
16	P_{7-8}	0.0069	40	P_{10}	-0.0884
17	Q_{7-8}	-0.2016	41	Q_{10}	-0.0674
18	P_{7-9}	0.2824	42	P_{11}	-0.0356
19	Q_{7-9}	0.1526	43	Q_{11}	-0.0156
20	P_{9-14}	0.0776	44	P_{12}	-0.0775
21	Q_{9-14}	0.0046	45	Q_{12}	-0.0038
22	P_{12-13}	0.0123	46	P_{13}	-0.1315
23	Q_{12-13}	0.0189	47	Q_{13}	-0.0635
24	P_{13-14}	0.0706			

状态估计结果见表 3。其中节点电压真值是通过含 UPFC 的 IEEE-14 系统仿真得到的, 常规状态估计是按照文献[6]提出的方法计算得到的。

表 3 状态估计结果及比较

Tab 3 State estimation results and their comparison

节点	真值		常规状态估计		本文方法	
	$V / p.u.$	$\theta / (^\circ)$	$V / p.u.$	$\theta / (^\circ)$	$V / p.u.$	$\theta / (^\circ)$
1	1.0600	0	1.0605	0	1.0603	0
2	1.0482	-4.9610	1.0486	-4.9614	1.0485	-4.9613
3	1.0136	-12.7442	1.0135	-12.7440	1.0136	-12.7440
4	1.0248	-10.5113	1.0246	-10.5119	1.0246	-10.5121
5	1.0323	-9.1016	1.0329	-9.1018	1.0326	-9.1019
6	1.0700	-15.2057	1.0702	-15.2047	1.0700	-15.2054
7	1.0543	-13.5684	1.0546	-13.5679	1.0541	-13.5682
8	1.0878	-13.5844	1.0872	-13.5840	1.0879	-13.5845
9	1.0382	-15.4531	1.0390	-15.4524	1.0386	-15.4536
10	1.0356	-15.4582	1.0359	-15.4586	1.0355	-15.4583
11	1.0496	-15.4532	1.0495	-15.4530	1.0495	-15.4530
12	1.0812	-14.4541	1.0811	-15.4537	1.0812	-15.4540
13	1.0534	-15.4523	1.0538	-15.4526	1.0534	-15.4525
14	1.0286	-16.3420	1.0283	-16.3414	1.0288	-16.3424

从表 3 结果分析可知, 本文提出的算法完全可行, 能较准确地反应考虑 UPFC 元件后系统的运行状态。从表 4 可知迭代收敛后 $P_B + P_E = 0$, UPFC 的其他控制参数也完全在许可范围内。另外, 为了突出本文算法的可行性, 以加权绝对值和作为目标函数进行了比较, 常规状态估计方法的目标函数值为 45.846, 本文方法的目标函数值 44.544, 可见本文提出的算法具有较高的精度。

表 4 收敛后 UPFC 控制参数

Tab.4 UPFC's controller parameters after convergency

	$V \angle \theta$	P	Q
串联电源	$0.077 \angle 44.08^\circ$	0.0056	0.0127
并联电源	$1.091 \angle -15.20^\circ$	-0.0056	-0.4389

4 结论

本文提出了一种基于内点法求解计及 UPFC 的电力系统状态估计算法。该算法以 WLAV 作为估计准则, 将 UPFC 元件的作用等效为一系列电压和功率的约束, 利用内点法可以方便地考虑其对系统状态的影响。通过 IEEE-14 节点系统的仿真计算, 验证了本文算法是有效可行的。

参考文献

- [1] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11):53-60.

反调现象。在汽机RUNBACK下, 录取无功功率变化图(如图7所示), 从图中可以看出无功反调峰值在可接受的范围内。

6 结论

通过对励磁系统的建模和仿真, 以及对MEC5220型数字式励磁调节器参数的调整和功能研究使发电机组的安全稳定运行得到大大的提高, 达到了在保证机组暂态稳定的前提下, 提高了机组的动态稳定裕度。同时, 电力系统稳定器按照调整后的参数投入运行后, 抑制了本机型低频振荡, 无功反调也在可接受的范围之内。

参考文献

- [1] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
LI Ji-cheng. Design and Application of Excitation System Modern Synchronous Generator[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

(上接第 32 页 continued from page 32)

- LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Status Quo and Prospect of Power System State Estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 53-60.
- [2] 孙元章, 刘前进. FACTS 控制技术综述——模型, 目标与策略[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 1-7.
SUN Yuan-zhang, LIU Qian-jin. A Summary of FACTS Control Technology——Model, Objective and Strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 1-7.
- [3] Gyugyi L, Schauder C D, Willimas S L, et al. The Unified Power Controller: a New Approach to Power Trans Control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 120-126.
- [4] 陈准金, 白中. 含 UPFC 电力系统潮流计算研究[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(3): 23-27.
CHEN Huai-jin, BAI Zhong. Load Flow Studies for Power Systems Equipped with UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(3): 23-27.
- [5] Singh H, Alvarado F L, Liu W H. Constrained LAV State Estimation Using Penalty Functions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 383-388.
- [6] 孙国强, 卫志农, 李阳林, 等. 计及统一潮流控制器的

- [2] 发电机投运报告[R]. 核电秦山联营有限公司, 2002.
Report of Generator's Operation[R]. Nuclear Power Qinshan Joint Venture Copmany Limited. 2002.
- [3] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Shi-zhang. Test of Generator Extitation System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [4] 方思立, 朱方. 电力系统稳定器的原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
FANG Si-li, ZHU Fang. Principle and Its Application of Power System Stabilizer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.

收稿日期: 2006-09-11; 修回日期: 2007-01-10

作者简介:

查卫华(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护及励磁控制研究; E-mail: chawh@npqjvc.cn

吴国忠(1944-), 男, 教授, 从事电力电子监测与控制研究;

樊平(1973-), 男, 工程师, 从事继电保护保护与控制工作。

- 电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 63-67.
- SUN Guo-qiang, WEI Zhi-nong, LI Yang-lin, et al. Power System State Estimation with UPFC Considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 63-67.
- [7] 张小平. 潮流和最优潮流分析中 FACTS 控制器的建模[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 22-29.
ZHANG Xiao-ping. Modeling of FACTS in Power Flow and Optimal Power Flow Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 22-29.
- [8] Celik M K, Abur A. Use of Scaling in WLAV Estimation of Power System States[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 684-692.
- [9] Clements K A, Davis P W, Frey K D. Treatment of Inequality Constraints in Power System State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(5): 567-574.

收稿日期: 2006-07-18; 修回日期: 2006-11-13

作者简介:

张海波(1976-), 男, 工程师, 从事输电线路运行研究;
沈茂亚(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行。E-mail: myshen@hhu.edu.cn