

考虑静态电压稳定裕度的含 UPFC 最优潮流计算方法研究

刘盛松¹, 周挺¹, 张宁宇², 罗凯明¹, 刘林¹, 徐贤¹

(1. 国网江苏省电力有限公司调度控制中心, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:提出一种考虑静态电压稳定裕度的含统一潮流控制器(UPFC)最优潮流计算模型及方法。模型中增加了局部电网的静态电压稳定裕度约束和 UPFC 运行约束条件,以及 UPFC 串联和并联侧等效电压源的幅值、相角等自变量。基于 Benders 分解法将模型分解为主模型和子模型,其中,主模型为典型的含 UPFC 最优潮流模型,子模型为静态电压稳定计算模型,通过 Benders 割建立主子模型间的协调优化,最终实现了整个模型的求解。以苏州南部 500 kV 为例进行仿真计算,结果验证了文中模型及算法的有效性。

关键词:统一潮流控制器;最优潮流;静态电压稳定;Benders 分解

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0062-05

0 引言

2017年12月,国家电网公司重大创新示范工程——苏州南部电网500 kV 统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)(简称苏南 UPFC)工程正式投运,是世界上电压等级最高、换流器容量最大的 UPFC 项目,标志着我国在电力电子应用领域达到了新的高度,同时也给我国电网的优化调度、灵活控制提供了新的手段。

虽然 UPFC 能够精确控制电网潮流,提高线路输送功率,但受负荷波动、电厂出力计划和电网运行方式等影响,UPFC 运行策略的制定存在一定困难。因此,为提高 UPFC 装置的运行效率,保证电网潮流的合理分布,提高电网运行的安全性,结合电网实际运行情况,掌握 UPFC 接入后的潮流优化方法,UPFC 运行策略最优化是今后面临的主要工作^[1-8]。文献[9]研究了 UPFC 控制策略对功率调节范围的影响,并采用多次潮流计算进行求解,但忽略了节点电压和线路载流能力等约束条件。文献[10-11]研究了 UPFC 接入电网对潮流分布的影响,提出了相应的控制策略。文献[12]对考虑 UPFC 的电网随机潮流计算方法进行了研究,并得到电压和线路功率的概率密度曲线。文献[13]提出了一种两阶段的含 UPFC 的电力系统潮流计算方法,并在仿真分析软件 PSS/E 中进行了仿真验证。在此基础上,文献[14]建立计及风电不确定性的含 UPFC 的最优潮流模型,由日内滚动调度和实时调度两阶段组成。文献[15]给出了含 UPFC 电力系统潮流的交替迭代算法,在求解系统潮流方程时,

收稿日期:2018-09-04;修回日期:2018-10-18

将 UPFC 用等效节点注入功率等值,在求解 UPFC 潮流方程时,将系统用恒定电压源代替。

在最优潮流(optimal power flow, OPF)数学模型的基础上,提出一种考虑局部电网静态电压稳定裕度的含 UPFC 最优潮流优化模型,并基于功率注入法建立的 UPFC 模型,利用 Benders 分解法进行求解,最后以苏州南部电网为例进行仿真验证。

1 UPFC 的等效发电机模型

1.1 等效电源模型

根据现有的研究成果,忽略 UPFC 有功损耗以及所在线路对地导纳,将串联侧换流器等效为电压源、并联侧换流器等效为电流源后,得到如图 1 所示的等效电路。

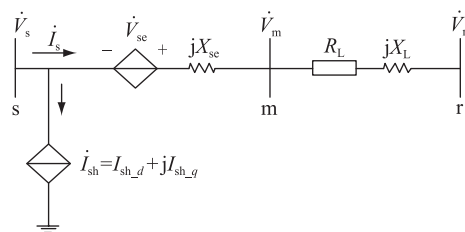


图 1 统一潮流控制器等效电路

Fig.1 The equivalent circuit of UPFC

图中,s 和 r 分别为线路首末端节点;m 为虚拟节点; \dot{V}_s , \dot{V}_r , \dot{V}_m 为相应节点的电压相量; \dot{V}_{sc} 为串联侧等效电压源的电压相量; \dot{I}_{sh} 为并联侧等效电流源的电流相量;定义 $I_{sh,d}$ 与 \dot{V}_s 同相位, $jI_{sh,q}$ 超前 \dot{V}_s 90°; X_{sc} 为串联变压器的等效漏抗; \dot{I}_s 为流出节点 s 的电流; R_L , X_L 分别为 UPFC 所在线路的电阻和电抗。

如图 1 所示,通过改变 UPFC 的控制变量 \dot{V}_{se} 和 \dot{I}_{sh} ,可精确控制节点 s 与 r 之间线路的传输功率。例如,文献[7]在 \dot{V}_{se} 幅值最大情况下,相角在 $0 \sim 2\pi$ 范围内依次取值后进行潮流计算,最终得到线路的功率调节范围,但存在计算量大且不能考虑节点电压和线路容量限制等缺点。

1.2 等效虚拟发电机模型

为实现 UPFC 所在线路最大传输功率的计算,将 UPFC 模型进行解耦,即两侧节点等效为虚拟发电机,具体如图 2 所示。

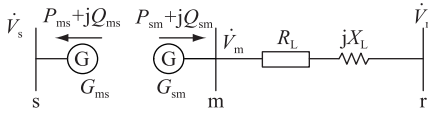


图 2 UPFC 解耦模型

Fig.2 UPFC decoupled model

图 2 中, G_{ms} 和 G_{sm} 为 2 台等效发电机,其注入节点的功率分别为 $P_{ms} + jQ_{ms}$ 和 $P_{sm} + jQ_{sm}$ 。根据线路两端有功功率相等的原理,2 台虚拟发电机存在以下功率约束条件:

$$P_{ms} + P_{sm} = 0 \quad (1)$$

根据图 1 所示的电路图得到虚拟发电机 G_{sm} 的功率计算公式如下:

$$P_{sm} = - [V_m V_{se} \sin(\theta_m - \theta_s - \theta_{se}) + V_s V_m \sin(\theta_m - \theta_s)] / X_{se} \quad (2)$$

$$Q_{sm} = - [V_m^2 - V_s V_{se} \cos(\theta_m - \theta_s - \theta_{se}) - V_s V_m \cos(\theta_m - \theta_s)] / X_{se} \quad (3)$$

虚拟发电机 G_{ms} 的有功出力由式(1)和式(2)计算得到,其无功出力计算公式如下:

$$Q_{ms} = - [V_m V_s + V_s V_{se} \cos \theta_{se} - V_s V_m \cos(\theta_s - \theta_m)] / X_{se} + V_s I_{sh,q} \quad (4)$$

为维持 UPFC 直流母线电压恒定,并联侧吸收有功功率应与串联侧输出有功相等,存在以下约束:

$$V_{se} V_m \sin(\theta_{se} - \theta_m) / X_{se} - V_s V_s \sin(\theta_{se} - \theta_s) / X_{se} = V_s I_{sh,d} \quad (5)$$

串联换流器容量约束位:

$$V_{se} |(\dot{V}_s + \dot{V}_{se} - \dot{V}_m) / jX_{se}| \leq S_{se} \quad (6)$$

式中: S_{se} 为串联换流器容量; $|\cdot|$ 为取幅值的符号。

串联换流器输出电压幅值约束为:

$$0 \leq V_{se} \leq V_{se,max} \quad (7)$$

式中: $V_{se,max}$ 为串联侧输出电压幅值的最大值。

并联换流器容量约束为:

$$V_s \sqrt{I_{sh,d}^2 + I_{sh,q}^2} \leq S_{sh} \quad (8)$$

式中: S_{sh} 为并联换流器容量。

式(1)一式(8)构成了 UPFC 的等效虚拟发电机模型,其中,控制变量为 P_{sm} , Q_{sm} , P_{ms} 和 Q_{ms} , 状态变量为 V_{se} , θ_{se} , $I_{sh,d}$ 和 $I_{sh,q}$ 。

2 含 UPFC 的 OPF 模型

2.1 目标函数

$$\min C_{sum} = \sum_{i \in N_G} a_i + b_i P_{G,i}^t + c_i (P_{G,i}^t)^2 \quad (9)$$

式(9)为文中模型的最小费用目标函数,为发电机的有功费用最小。 a_i, b_i, c_i 为机组费用的系数。

2.2 电网运行约束条件

(1) 节点功率平衡。节点有功、无功平衡:

$$P_{G,i} = P_{L,i} + V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_{G,i} = Q_{L,i} + V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

$$i, j \in N_B$$

(2) 线路有功约束:

$$P_{L,i,j,min} \leq P_{L,i,j} \leq P_{L,i,j,max} \quad i, j \in N_B \quad (12)$$

(3) 节点电压约束:

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad i \in N_B \quad (13)$$

式(10)一式(13)为交流电网运行约束条件,其中,节点功率平衡保证电网潮流的收敛性,线路有功约束保证电网中所有线路均运行在载流量以内,节点电压约束则保证电压运行在合理范围内。各变量含义如下: N_B 为电网中常规交流节点的数量; $P_{G,i}$, $Q_{G,i}$ 分别为发电机 i 的有功、无功出力; $P_{L,i}$, $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 的有功、无功负荷; $P_{L,i,j}$ 为线路 $i-j$ 的有功功率; $P_{L,i,j,max}$, $P_{L,i,j,min}$ 分别为线路 $i-j$ 的有功功率上下限; $V_{i,max}$, $V_{i,min}$ 分别为节点 i 电压幅值的上下限。

(4) 发电机约束条件:

$$\underline{P}_{G,i,min} \leq P_{G,i} \leq \bar{P}_{G,i,max} \quad (14)$$

$$\underline{Q}_{G,i,min} \leq Q_{G,i} \leq \bar{Q}_{G,i,max} \quad (15)$$

式中: $\bar{P}_{G,i,max}$, $\underline{P}_{G,i,min}$ 分别为发电机 i 有功出力上下限; $\bar{Q}_{G,i,max}$, $\underline{Q}_{G,i,min}$ 分别为发电机 i 无功出力上下限。

2.3 静态电压稳定约束条件

电压稳定指标是对系统接近电压崩溃程度的一种度量,不同的理解将构造出不同的电压稳定指标,文中采用静态电压稳定裕度指标来描述局部电网的电压稳定性。

静态电压稳定裕度指标定义为:从系统给定运行状态出发,按照某种模式,通过负荷增长或传输

功率的增加逐步逼近电压崩溃点,则系统当前运行点到电压崩溃点的距离可作为电压稳定程度的指标,如下式所示:

$$\alpha_{\text{VSM}} > \alpha_{\text{min}} \quad (16)$$

$$\alpha_{\text{VSM}} = (P_{1*} - P_{10})/P_{10} \quad (17)$$

式中: α_{VSM} 为静态电压稳定裕度值; α_{min} 为电网运行的最小静态电压稳定裕度要求; P_{10} 为初始运行点的有功负荷; P_{1*} 为电压崩溃点的有功负荷。

3 模型的分解及求解

式(1)一式(17)组成的含 UPFC 最优潮流模型为典型的多维、非线性问题,如直接求解存在较大困难,根据模型特点将其分解为最优潮流主模型和静态电压稳定子模型,然后对各子模型进行求解的基础上,基于 Benders 分解理论建立主模型与子模型之间的协调机制,当主模型的优化结果同时满足两个子模型的验证计算时,得到整个模型的最优解。

3.1 最优潮流主模型

主模型为忽略静态电压稳定约束的含 UPFC 最优潮流问题,由目标函数(1)、约束条件(2)一(15)以及由静态电压稳定子模型返回的 Benders 割组成,可以采用非线性内点法求解。内点法是拉格朗日函数、牛顿方法和对数障碍函数三者的结合,其对不等式约束的处理能力较强,不需要识别起作用约束集,这是内点法的一个较大的优势,同时具有对问题规模不敏感的优点。

3.2 静态电压稳定计算子模型

该子模型用于检验最优潮流主模型优化结果是否满足静态电压稳定计算子模型,本质上是潮流计算问题,根据 α_{min} 对应的有功负荷,采用传统牛顿-拉夫逊计算进行求解,为形成 Benders 割,将单步迭代中解方程转化成线性规划问题,如式(18)一式(21)所示。其中, P_{M1} , Q_{M1} , P_{M2} , Q_{M2} 分别为节点有功功率、无功功率的非负松弛变量;式(19)为节点有功、无功功率的线性化方程;式(20)、式(21)为发电机有功、无功上下限约束, H, N, J, L 为相应方程对自变量的一阶导数系数矩阵。除平衡节点外,其余节点的有功增量需满足式(20), $\pi, \underline{\psi}, \bar{\psi}$ 为约束条件相应的单纯形乘子。

$$\min w(P_G^*, I^*) = \sum_{i \in N} (P_{Mi,1} + P_{Mi,2}) \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_G \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{M1} \\ Q_{M1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{M2} \\ Q_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dP \\ dQ \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Delta P = 0 \quad \pi \quad (20)$$

$$\Delta Q_{\text{min}} \leq \Delta Q \leq \Delta Q_{\text{max}} \quad \underline{\psi}, \bar{\psi} \quad (21)$$

该子模型的求解流程如下:

步骤 1:设置最大允许误差 ε 和最大迭代次数 I_{Tmax} , $I_{\text{iter}} = 1$,初始化节点有功和无功输入功率、节点电压;

步骤 2:计算系数矩阵和右端不平衡量,以及变量上下限;

步骤 3:采用线性规划方法求解上述模型,得到 $\Delta P, \Delta Q, \Delta \theta, \Delta V$ 全部松弛变量的值;

步骤 4:更新所有变量,如果 $\min(\Delta P, \Delta Q, \Delta \theta, \Delta V) \leq \varepsilon$ 或 $I_{\text{iter}} \geq I_{\text{Tmax}}$,结束计算;否则, $I_{\text{iter}} = I_{\text{iter}} + 1$,返回步骤 2。

经过若干次线性规划问题的求解,如果 t 时段目标函数 $(w^t)^* = 0$,表明该时段机组启停和有功出力变量满足网络安全约束,否则需形成 Benders 割约束条件返回到主模型中重新计算,具体计算如下:

$$(w^t)^* + \sum_{i \in N_G} \pi_{ii} [P_{G,i}^t - (P_{G,i}^t)^*] + \sum_{i \in N_G} \bar{\psi} Q_{G,\text{max}} [I_{G,i}^t - (I_{G,i}^t)^*] \leq 0 \quad (22)$$

Benders 割约束条件的存在,使得最优潮流主模型重新求解出的有功出力和 UPFC 控制目标尽可能的消除 $(w^t)^*$,如此循环最终得到满足静态电压稳定约束的机组最优有功出力。整个模型计算流程见图 3。

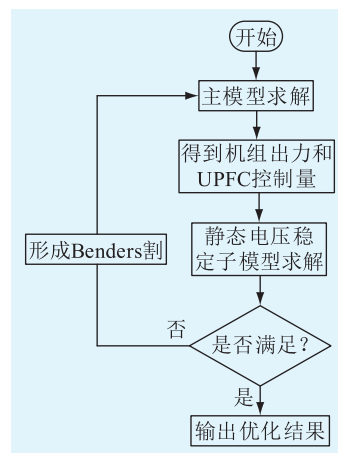


图 3 模型求解流程

Fig.3 The flow chart of solving models

4 算例分析

以某年度江苏电网为例,选取 500 kV 苏州南部电网进行潮流分析,对提出的计及 UPFC 的潮流和 OPF 模型进行了验证,其中苏州南部电网为负荷中心,主要受电通道为:梅里—木渎双线、东吴—全福双线和斗山—熟南断面。

500 kV 苏州南部电网示意图如图 4 所示,电网规模说明如下:500 kV 变电站 8 座,主变 21 台,220 kV 变电站 74 座,电网装机容量 8 956 MW。

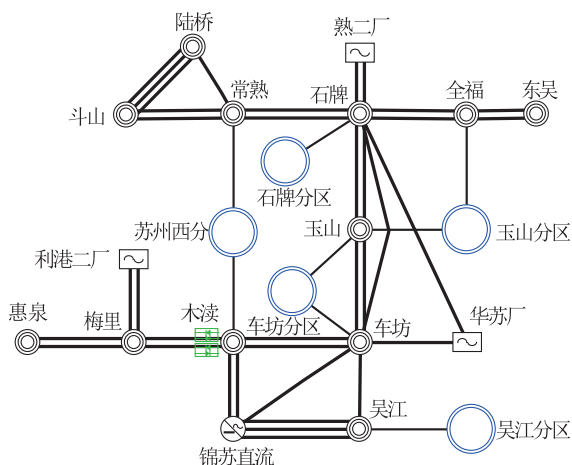


图 4 500 kV 苏州南部电网

Fig.4 Diagram of 500 kV southern Suzhou power grid

苏南 UPFC 将安装在 500 kV 木渎变,该装置 1 台并联换流器通过并联变压器接入木渎变,2 台串联换流器通过 2 台串联变压器分别串联接入 500 kV 梅里—木渎双线,以控制该通道送电水平,从而达到优化 500 kV 苏州南部电网潮流分布的目的。UPFC 包括 3 组换流器,每组容量为 250 MV·A。

在考虑苏州南部电网静态电压稳定裕度情况下,采用文中算法对上述模型进行求解后,优化结果如表 1 所示。

表 1 苏州南部电网最优机组出力

Table 1 The optimal result of Units in southern Suzhou power grid MW

电源	装机容量	有功出力
华能太仓	120 0	100 5
常熟二厂	195 0	189 6
望亭燃机	780	780
望亭煤机	640	640
北部燃机	360	205
苏州燃机	540	523
吴江燃机	360	317
蓝天燃机	360	360
华苏电厂	640	640
环保电厂	130 0	130 0
昆山燃机	800	794

此外,根据计算结果,在上述机组有功出力情况下,静态电压稳定裕度满足 8% 的要求。忽略约束(16)和(17)情况下求解,静态电压稳定裕度将小于 8%。这是由于 UPFC 通过潮流调节(梅里—木渎双线功率调节范围约 ± 60 MW)增加了苏州南部

表 2 500 kV 交流受电通道潮流(苏南 UPFC)

Table 2 Power flows of 500 kV AC lines with UPFC

序号	500 kV 交流受电通道	潮流/MW
1	梅里—木渎双线(UPFC)	2 910
2	斗山—常熟双线	1 938
3	陆桥—常熟单线	520
4	东吴—全福双线	319

电网东吴—全福断面、斗山—熟南断面的功率,使得静态电压稳定裕度满足要求。

5 结语

UPFC 作为一种柔性潮流控制装置,具有重要的工程应用价值。文中在含 UPFC 的最优潮流模型中增加了局部电网的静态电压稳定裕度约束和 UPFC 运行约束条件,以及 UPFC 串联和并联侧等效电压源的幅值、相角等自变量。基于 Benders 分解法将模型分解为主模型和子模型,通过 Benders 割建立主子模型间的协调优化,最终实现了整个模型的求解。以苏州南部 500 kV 电网为例进行仿真计算,验证了文中模型及算法的有效性。

参考文献:

- [1] 覃庆良,李梅航,于飞. 多端柔性直流输电系统中的低电压穿越问题[J]. 电力系统及其自动化学报,2015, 27(9): 91-96.
QIN Qingliang, LI Meihang, YU Fei. LVRT problems in multi-terminal VSC HVDC system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(9): 91-96.
- [2] 任涛,张杰,唐剑钊,等. MMC-HVDC 模块电容器预充电策略及仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2013, 25(5):144-148.
REN Tao, ZHANG Jie, TANG Jianzhao, et al. MMC-HVDC charging strategy reasearch and simulation analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5):144-148.
- [3] 阎博,汪可友,CROW M 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, CROW M 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] 王琦,易俊,刘丽平,等. 基于直流侧储能的新型统一潮流控制器优化设计[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(17): 4371-4378.
WANG Qi, YI Jun, LIU Liping, et al. Optimal design of a Novel unified power flow controller incorporated with a battery energy storage system at DC side [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4371-4378.
- [5] 罗德荣,姬小豪,廖武,等. 海上风电 VSC-HVDC 系统的直接功率控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2016, 28(6): 43-48.
LUO Derong, JI Xiaohao, LIAO Wu, et al. Direct power

- control of VSC-HVDC system for offshore wind farms [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 43-48.
- [6] LI Canbing, XIAO Liwu, CAO Yijia, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [7] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及期谐波特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonic analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [8] GYUGYI L, SCHSTRUDER C D, EDRIS A. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [9] 刘梨明, 康勇, 陈坚, 等. 统一潮流控制器控制策略的研究与实现 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 114-119.
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Control scheme and implement of a unified power flow controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 114-119.
- [10] 郑华, 高芬. 统一潮流控制器潮流模型及功率调节能力分析 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 43-49.
ZHENG Hua, GAO Fen. Analysis of unified power flow controller model and its control capability of power flow [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 43-49.
- [11] 陈业飞, 李林川, 张芳, 等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 69-74.
CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.
- [12] 仇志华, 徐丙垠, 陈青. 基于统一潮流控制器的配电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] 宋鹏程, 王莹, 许文超, 等. 含 UPFC 的电力系统潮流计算方法研究 [J]. 江苏电机工程, 2016, 35(1): 24-27.
SONG Pengcheng, WANG Ying, XU Wenchao, et al. Load flow calculation study for power systems containing UPFC [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1): 24-27.
- [14] 钱臻, 刘建坤, 陈静, 等. 计及风电不确定性的含 UPFC 电力系统的两阶段最优潮流 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 80-86.
QIAN Zhen, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Two-stage OPF considering wind-power uncertainty for power system with UPFC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 80-86.
- [15] 王毅, 董毅峰, 侯俊贤, 等. 基于模块化功率注入模型的含 UPFC 电力系统潮流算法研究 [J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2537-2542.
WANG Yi, DONG Yifeng, HOU Junxian, et al. Research on power flow algorithm of power system with UPFC based on modular power injection model [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2537-2542.

作者简介:



刘盛松

刘盛松(1974),男,博士,高级工程师,从事电力系统计算与分析、运行方式管理工作 (E-mail: liussus@sina.com);

周挺(1979),男,硕士,高级工程师,从事电力系统计算与分析、运行方式管理工作;

张宁宇(1985),男,博士,高级工程师,从事电力系统优化与运行、FACTS 技术在电力系统中的应用工作。

Optimal power flows with UPFC and minimum voltage stability constraint

LIU Shengsong¹, ZHOU Ting¹, ZHANG Ningyu², LUO Kaiming¹, LIU Lin¹, XU Xian¹

(1. Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: A model of optimal power flow with UPFC and minimum voltage stability constraint is proposed. In the model, equivalent sources of series and shunt side UPFC are built so that amplitude and angle of such sources are treated as variables. Based on Benders decomposition, two sub-models are established. The previous one is OPF model, while the other is used to deal with minimum voltage stability constraint. The coordinated optimization between master and sub-models is established by Benders cut, and the solution of the whole model is finally realized. In the end, southern Suzhou power grid is applied to test the correctness of the above model.

Keywords: unified power flow controller (UPFC); optimal power flow; voltage stability; Benders decomposition

(编辑 钱悦)