

计及IPFC的可用输电能力的计算

根据线间潮流控制器的物理特性, 基于功率注入法建立了该装置的一种数学模型。基于最优潮流计算模型得到计及线间潮流控制器 (IPFC) 装置的可用输电能力计算模型, 并利用有牛顿法、拉格朗日函数法与对偶障碍函数法相结合的改进算法对该模型进行求解。算例应用IEEE-30节点系统, 通过文中模型与算法实践, 对结果进行分析, 发现IPFC可以灵活控制两条线路间的有功功率, 验证了该算法对该模型是可行和有效的。

宋莉¹ 尹鹏² 沈佳星³ 陈文福¹ 林琳⁴ 1. 国网天津市电力公司 2. 国网天津市电力公司城西供电分公司 3. 国网天津市电力公司城东供电分公司 4. 国网天津市电力公司电力科学研究院



宋莉/工程师

0 引言

随着特高压电网的快速发展, 电力系统迈入超高压远距离输电、跨区域联网的新阶段, 对系统稳定运行控制的要求越来越高, 因此需要发明新的调节手段, 提高系统可控性。在这种情况下, 柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 的概念被提出, 在电网智能化、区域互联化的现代电力系统中, 如何在满足电网稳定运行的前提下使得电网裕度得到充分利用是非常值得研究的领域, 可以减少新增投资。随着该领域研究工作的深入, 电力系统可用输电能力 (available transfer capability, ATC) 被提出, 反映了电网在最大运行方式下区域间线路还

能够输送电力的能力, 即稳定裕度。所以随着大量柔性交流输电装置的应用, 研究考虑柔性交流输电装置的可用输电能力计算和相应控制策略具有重要的价值^[3-5]。

从研究方法的角度划分, 可用输电能力 (ATC) 的研究方法主要有2种: 一种是基于确定性理论的求解方法, 另一种是基于概率理论的求解方法。基于概率理论的求解方法是利用电力系统发、输、变电设备运行时状态随机、不确定的特性, 模拟出电力系统运行可能会出现运行状态, 包括正常运行状态和故障状态, 然后基于所模拟的各种状态, 应用现代的智能算法计算系统区域间的可用输电能力 (ATC) 目标值, 通过比较各种方式下的目标值, 得出最优的可用输电能力 (ATC) 值, 但是随机方法由于模拟状态非常多, 所以该方法的计算量很大^[6]。

目前应用比较广泛的直流潮流法^[7]、连续潮流法^[8]和最优潮流法^[9-10]是计算ATC目标值的确定性的求解方法。这3种方法各有优缺点: 连续潮流法考虑的约束条件比较全面, 也能满足不同的运行方式及不同类型故障模拟, 不足之处就是不能更好的优化发电与用电负荷; 直流潮流法可以考虑各种线性分布因子, 利用线性规划理论进行求解计算, 但是其不足之处在于对系统电压、系统无功潮流等非线性因素影响考虑不够; 最优潮流法首先确定目标函数, 一般将系统区域间最大输电能力或可用输电能力 (ATC) 作为目标函数, 将潮流计算方程、电压幅值与相角约束、线路热稳定

关键词/Keywords

线间潮流控制器 ·
输电能力 ·
最优潮流 ·
电力系统 ·

约束和线路额定输送功率等作为约束条件,从而把追求目标函数最大化的过程通过数学方式转变成为一个非线性规划的数学问题,采用当前常用的常规优化算法与智能优化算法进行求解,其中智能优化算法有神经网络法^[11]、鱼群算法和蚁群算法等,常规优化算法主要有计算方便收敛较快的内点法^[12-13]、利用线性规划理路的二次规划法^[14]以及基于模糊计算的遗传算法^[15]等。

随着FACTS技术的发展,用于调整不同线路间有功功率及电压的新型控制器被提出,即线间潮流控制器(Interline Power Flow Controller, IPFC)。IPFC不但能够合理调节不同线路之间的潮流,而且可以适当调整节点电压,从而达到系统最优运行方式,提高可用输电能力。

2 IPFC模型的建立

2.1 IPFC功率注入模型

根据SSSC装置的物理特性及工作原理,由于SSSC装置一般串联接在不同输电线路,在二次侧将控制SSSC装置的直流侧正确连接起来,即可实现IPFC装置的功能,通过一定的控制策略进行控制,实现所连接线路间的有功功率交换。假设在节点*i*处装设IPFC装置,等效电路图如图1所示^[18]。

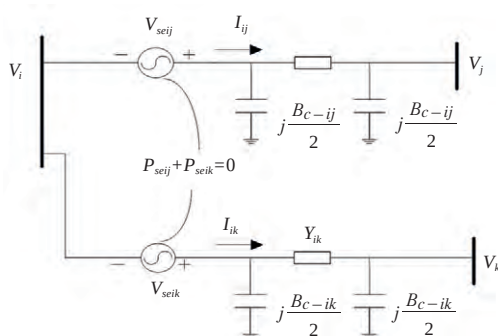


图1 IPFC等效电路图

采用功率注入法建立IPFC模型,避免了在矩阵中产生可变元素或计算时增加节点导纳矩阵的维数。所谓功率注入法实际上是一种网络拓扑变换,将IPFC对系统的调节作用由线路转移至其两侧的节点,不需要增加新节点修正节点导纳矩阵^[19]。

按照功率注入方法和上图所表示的等效线路图,IPFC的功率注入模型为

$$S_i^I = -\sum_m \dot{V}_i \left[\dot{V}_{seim} \left(Y_{im} + j \frac{B_{C-im}}{2} \right) \right]^* \quad (1)$$

$$S_m^I = \dot{V}_m (\dot{V}_{seim} Y_{im})^* \quad (2)$$

将式(1)、(2)展开并整理可得

$$P_i^I = -\sum_m V_i V_{seim} \left[G_{im} \cos(\theta_i - \theta_{seim}) + (B_{im} + B_{C-im}/2) \sin(\theta_i - \theta_{seim}) \right] \quad (3)$$

$$Q_i^I = -\sum_m V_i V_{seim} \left[G_{im} \sin(\theta_i - \theta_{seim}) - (B_{C-im}/2) \cos(\theta_i - \theta_{seim}) \right] \quad (4)$$

$$P_m^I = V_m V_{seim} \left[G_{im} \cos(\theta_i - \theta_{seim}) + B_{im} \sin(\theta_i - \theta_{seim}) \right] \quad (5)$$

$$Q_i^I = V_m V_{seim} \left[G_{im} \sin(\theta_i - \theta_{seim}) - B_{im} \cos(\theta_i - \theta_{seim}) \right] \quad (6)$$

式中, S_i^I 、 S_m^I 分别为IPFC对节点*i*、*m*注入的复功率, $m=j, k, \dots$, 是与IPFC所控制的多条线路相对应的节点, G_m 和 B_m 分别为节点导纳中相应的元素, P_i^I 、 Q_i^I 、 P_m^I 、 Q_m^I 分别为IPFC对节点*i*、*m*注入的有功和无功功率。

2.2 IPFC的目标控制约束条件

线路在安装IPFC装置后,通过调整所安装节点电压幅值与相角,改变节点所连接线路输送的有功功率,使得相连线路之间有功功率分部更加合理,提高联络线输电能力。

$$P_{mi} - P_{mi}^{def} = 0, Q_{mi} - Q_{mi}^{def} = 0 \quad (7)$$

$$P_{mi} = V_m^2 G_{im} - V_i V_m \left[G_{im} \cos(\theta_m - \theta_i) + B_{im} \sin(\theta_m - \theta_i) \right] - V_m V_{seim} \left[G_{im} \cos(\theta_m - \theta_{seim}) + B_{im} \sin(\theta_m - \theta_{seim}) \right] \quad (8)$$

$$Q_{mi} = V_m^2 G_{im} - V_i V_m \left[G_{im} \sin(\theta_m - \theta_i) - B_{im} \cos(\theta_m - \theta_i) \right] - V_m V_{seim} \left[G_{im} \sin(\theta_m - \theta_{seim}) - B_{im} \cos(\theta_m - \theta_{seim}) \right] \quad (9)$$

假设有功功率流向为从节点*m*到节点*i*, Q_{mi} 、 P_{mi} 分别为线路*mi*无功和有功功率, Q_{mi}^{def} 、 P_{mi}^{def} 分别为线路*mi*无功和有功功率的给定值。

2.3 IPFC的运行约束条件

如果不考虑IPFC装置各元件的功率损耗,

IPFC装置内部功率之和为零,即

$$\sum_m P_{seim} = 0 \quad m = j, k, \dots \quad (10)$$

串联电压源的相角和幅值也应该在允许范围之内,即

$$\begin{aligned} V_{seim}^{\min} &\leq V_{seim} \leq V_{seim}^{\max} \\ \theta_{seim}^{\min} &\leq \theta_{seim} \leq \theta_{seim}^{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\theta_{seim}^{\min}$ 、 $\theta_{seim}^{\max}$ 、 $V_{seim}^{\min}$ 和 $V_{seim}^{\max}$ 分别为IPFC串联电压源的相角和幅值的最小值与最大值。

3 建立计及IPFC装置的可用输电能力计算模型

在常规最优潮流模型的基础上,考虑IPFC装置的有功功率、无功功率平衡、电压幅值及相角满足额定范围等约束条件,即式(7)~式(11)所示的目标控制约束条件和运行约束条件,将目标控制和运行约束条件增加到相应的等式和不等式约束条件中,然后将IPFC装置的功率注入模型嵌入到最优潮流模型中,在模型变量中增加IPFC的控制变量,建立模型如下

$$\max f(x) = \sum_{i \in A, j \in B} P_{ij}(x) - \sum_{i \in A, j \in B} P_{ij} \quad (12)$$

式中,公式都表示从区域A到区域B之间, $\sum P_{ij}(x)$ 表示所有联络线上的有功功率之和, $f(x)$ 表示所有联络线上的有功功率与基态传输有功功率之差, $\sum P_{ij}$ 表示基态下所有联络线上的有功功率之和^[5]。

装入IPFC装置后,最优潮流模型中还要考虑IPFC节点注入功率,在常规最优潮流方程中的约束方程中将IPFC装置的附加注入功率考虑进去,数学表达式为

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{l=1}^n V_l (G_{il} \cos \theta_{il} + B_{il} \sin \theta_{il}) - P_i^F = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{l=1}^n V_l (G_{il} \sin \theta_{il} - B_{il} \cos \theta_{il}) - Q_i^F = 0 \\ P_m - V_m \sum_{l=1}^n V_l (G_{ml} \cos \theta_{ml} + B_{ml} \sin \theta_{ml}) - P_m^F = 0 \\ Q_m - V_m \sum_{l=1}^n V_l (G_{ml} \sin \theta_{ml} - B_{ml} \cos \theta_{ml}) - Q_m^F = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $m=j, k, \dots$; P_i 、 Q_i 代表系统节点i瞬时有功和瞬时无功功率; n 代表系统节点数量; P_i^F 、 Q_i^F 代表IPFC装置功率注入模型在节点i的瞬时有功和

瞬时无功功率; P_m 、 Q_m 代表节点m的瞬时有功和瞬时无功功率,其具体表示为式(3)、(4); P_m^F 、 Q_m^F 代表IPFC装置功率注入模型在节点m的瞬时有功和瞬时无功功率,如式(5)、(6)所示。

增加IPFC装置后,不但要考虑上述表示节点功率平衡的方程约束,而且必须将IPFC装置等效注入功率模型的目标控制约束和内部功率平衡约束考虑在内。不等式约束表述如下

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i \in S_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & i \in S_G \\ P_{Li}^{\min} \leq P_{Li} \leq P_{Li}^{\max} & i \in S_L \\ Q_{Li}^{\min} \leq Q_{Li} \leq Q_{Li}^{\max} & i \in S_L \\ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} & i \in S_N \\ |P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} & i, j \in S_N, i \neq j \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_{Li}^{\min}$ 、 $P_{Li}^{\max}$ 、 $Q_{Li}^{\min}$ 和 $Q_{Li}^{\max}$ 代表系统负荷瞬时有功和瞬时无功功率上下限; $P_{ij}^{\max}$ 为线路ij的热稳定极限; P_{ij} 为节点i到节点j的线路输送的有功功率; $P_{Gi}^{\min}$ 、 $P_{Gi}^{\max}$ 、 $Q_{Gi}^{\min}$ 和 $Q_{Gi}^{\max}$ 代表系统中发电装置瞬时有功和瞬时无功上下限; S_G 代表所有发电装置节点集合; $V_i^{\min}$ 、 $V_i^{\max}$ 代表系统节点电压上下限; S_N 代表系统节点集合; S_L 代表系统负荷节点集合。

4 路径跟踪内点法

原对偶内点法先由对数障碍函数得到中心路径,然后用牛顿法跟踪该路径,直到得到最优解。该方法将常规的牛顿法、对偶障碍函数法和拉格朗日函数法进行优化结合。将IPFC装置的功率注入模型嵌入到最优潮流模型中,得到考虑IPFC装置的可用输电能力(ATC)计算模型,通过数学模型简化为一般非线性优化模型

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{st. } h(x) &= 0 \\ g &\leq g(x) \leq \bar{g} \end{aligned} \quad (15)$$

引入松弛变量u和将不等式约束转化为等式约束

$$g(x) + u = \bar{g} \quad g(x) - l = g \quad (16)$$

其中松弛变量 $u=[u_1, u_2, \dots, u_r]^T$, $l=[l_1, l_2, \dots, l_r]^T$, 应该满足 $u>0$, $l>0$, 对原目标函数施加障碍函数后原优化问题变为如下优化问题

$$\begin{aligned} \min & f(x) - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \\ \text{st. } & h(x) = 0 \\ & g(x) + u = \bar{g} \\ & g(x) - 1 = g \end{aligned} \quad (17)$$

式中, 只有满足 $u > 0$ 、 $l > 0$ 条件的情况下, 模型才能收敛并获得最优值, 通过数学变换, 把含有不等式约束的优化模型转换成了只含有等式约束条件的优化模型。然后将拉格朗日乘子法应用到模型求解中。首先构造拉格朗日函数

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - 1 - g] - w^T [g(x) + u - \bar{g}] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \quad (18)$$

式中, $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, $z = [z_1, z_2, \dots, z_r]$, $w = [w_1, w_2, \dots, w_r]$ 代表拉格朗日乘子。对各个变量及其乘子求一阶偏导, 得到其Kuhn—Tucker条件, 即最优条件

$$L_x = \frac{\partial L}{\partial x} \equiv \nabla_x f(x) - \nabla_x h(x)y - \nabla_x g(x)(z + w) = 0 \quad (19)$$

$$L_y = \frac{\partial L}{\partial y} \equiv h(x) = 0 \quad (20)$$

$$L_z = \frac{\partial L}{\partial z} \equiv g(x) - 1 - g = 0 \quad (21)$$

$$L_w = \frac{\partial L}{\partial w} \equiv g(x) + u - \bar{g} = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_l = \frac{\partial L}{\partial l} = z - \mu L^{-1}e = 0 \Rightarrow \\ L_l^\mu = LZ - \mu e = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} L_u = \frac{\partial L}{\partial u} = -w - \mu U^{-1}e = 0 \Rightarrow \\ L_u^\mu = UW - \mu e = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_r)$; $U = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_r)$; $Z = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_r)$ $W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_r)$ 。将式(23)、式(24)联立求解得到

$$\mu = \frac{l^T z - u^T w}{2r} \quad (25)$$

对对偶间隙进行定义 $\text{GAP} = l^T z - u^T w$, 可得

$$\mu = \frac{\text{Gap}}{2r} \quad (26)$$

同时引入了中心参数 σ , 为了获得较好的收

敛效果, 具体表示为

$$\mu = \sigma \frac{\text{Gap}}{2r} \quad (27)$$

式中, $\sigma \in (0, 1)$ 称为中心参数。

采用牛顿—拉夫逊法求解式(19)~式(24)组成的非线性方程组。通过求解以上方程组可以得到第 k 次迭代的修正量, 最优解新近似为

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_p \Delta x, \quad l^{(k+1)} = l^{(k)} + \alpha_p \Delta l \quad (28)$$

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + \alpha_p \Delta u, \quad y^{(k+1)} = y^{(k)} + \alpha_d \Delta y \quad (29)$$

$$z^{(k+1)} = z^{(k)} + \alpha_d \Delta z, \quad w^{(k+1)} = w^{(k)} + \alpha_d \Delta w \quad (30)$$

式中, α_p 、 α_d 为迭代步长, 通常通过下式确定。

$$\alpha_p = 0.9995 \min \left\{ \min_i \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}, \Delta l_i 0; \frac{-u_i}{\Delta u_i}, \Delta u_i 0 \right), 1 \right\} \quad (31)$$

$$\alpha_d = 0.9995 \min \left\{ \min_i \left(\frac{-z_i}{\Delta z_i}, \Delta z_i 0; \frac{-w_i}{\Delta w_i}, \Delta w_i 0 \right), 1 \right\} \quad (32)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, r$ 通过上述迭代格式可获得最优解。

5 算例分析

分别假设系统中装有1个IPFC装置、2个IPFC装置和未安装IPFC装置, 应用国际通用的仿真算例IEEE-30节点系统, 分别进行了计及IPFC装置的区域1~区域3的ATC仿真计算。

其中, IPFC装置相角上限为 360° , 下限为 0° , 串联电压源幅值的上限为0.3, 下限为0。设在线路2-6、4-6装设1个IPFC和在2-6、4-6、17-10、20-10装设2个IPFC, 将系统中IPFC装置所装设节点的电压幅值、相角作为控制对象, 从而灵活控制所在支路的有功功率, 分别计算区域1到区域3的ATC。系统框图如图2所示。

下表给出了不含有IPFC装置、含有1个IPFC装置和2个IPFC装置的区域1~区域3的ATC值。通过数据可以分析出, 装设IPFC装置后, 通过适当调节, 区域1~区域3的ATC值都有不同程度的提高; 图3~图5表明了对偶间隙随迭代次数的变化, 装设IPFC装置后, ATC计算模型的等式约束、变量及

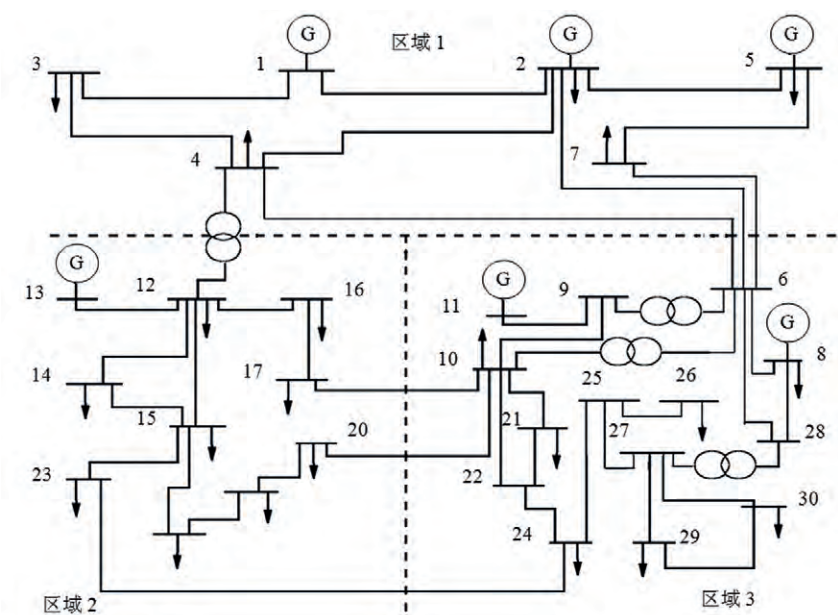


图 2 IEEE-30节点系统框图

不等式约束都相应增加，因此迭代次数也有所增加，并且迭代的次数随着装设装置的数量增多而增多。

表 ATC值以及迭代次数

数量	ATC值	迭代次数
0	0.979 5	38
1	1.659 7	48
2	1.146 6	62

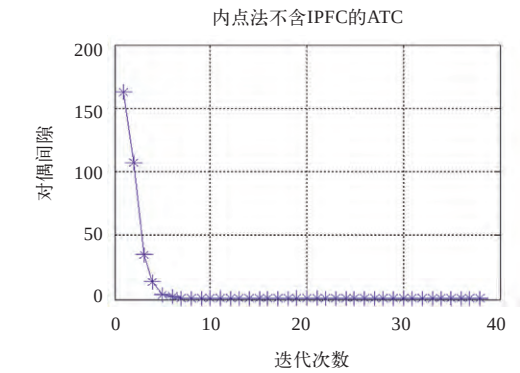


图 3 不含IPFC对偶间隙随迭代次数的变化

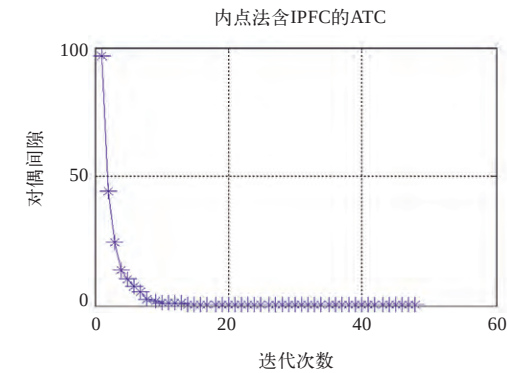


图4 含1个IPFC对偶间隙随迭代次数的变化

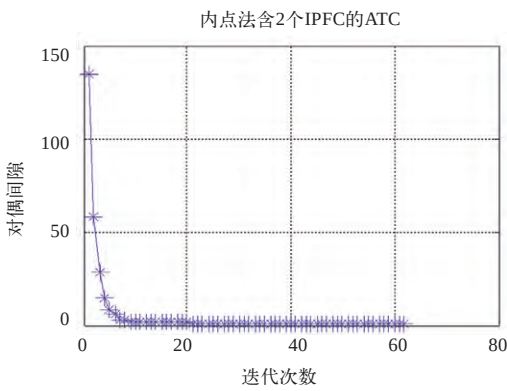


图5 含2个IPFC对偶间隙随迭代次数的变化

6 结束语

本文通过合理利用最优潮流模型、功率注入模型建立了考虑IPFC装置的ATC计算模型；应用牛顿法、拉格朗日函数法和

结合的原对偶内点法求解优化问题。通过对IEEE-30节点系统的算例进行仿真,显示了IPFC装置的灵活的控制能力,同时验证了模型的合理性和算法的有效性。

参考文献

- [1] North American Electric Reliability Council. Available transfer capability definitions and determination[R]. New Jersey: North American Electric Reliability Council, 1996.
- [2] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20-25.
- [3] 叶鹏, 宋家华. 串联FACTS装置提高区域间可用输电能力的数值研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 23-27.
- [4] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49.
- [5] 李国庆, 宋莉, 李筱婧. 计及FACTS装置的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.
- [6] 李国庆, 李雪峰, 沈杰, 等. 牛顿法和内点罚函数法相结合的概率可用功率交换能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 17-22.
- [8] 王成山, 李国庆, 余贻鑫, 等. 电力系统区域间功率交换能力的研究(一): 连续型方法的基本理论及应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 23-26.
- [9] Landgren G L, Terhune H L, Angel R K. Transmission interchange capability analysis by computer[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1992, 91(6): 748-754.
- [0] 汪峰, 白小民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 35-40.
- [10] 默哈莫德·夏班, 刘皓明, 倪以信, 等. 静态安全约束下基于Benders分解算法的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 7-11.
- [11] Luo X, Patton A D, Singh Real C. Power transfer capability calculations using multi-layer feed-forward neural networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 903-908.
- [12] 李国庆, 沈杰, 申艳杰. 考虑暂态稳定约束的可用功率交换能力计算的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 67-71.
- [13] 李国庆, 郑浩野. 一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 20-25.
- [14] 刁勤华, 默哈莫德·夏班, 倪以信. 运用连续二次规划法计算区域间极限传输容量[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 5-8.
- [15] Mozafari B, Ranjbar A M, Shirani A R, et al. A comprehensive method for available transfer capability calculation in a deregulated power system[C]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power technologies (DRPT2004), Hong Kong, 2004.
- [16] Xiao Ying, Song Y H, Liu C C. Available transfer capability enhancement using FACTS devices[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(1): 305-312.
- [17] 张立志, 赵冬梅. FACTS优化配置提高电网最大输电能力[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 58-62.
- [18] 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.
- [19] Zhang X P. Modeling of the interline power flow controller and the generalized unified power flow controller in Newton power flow [J]. IEE Proceedings Generation, Transmission. Distribution, 2003, 150(3): 268-274.

(收稿日期: 2015-05-15) EA

作者简介

宋莉 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向电力系统安全稳定运行、电力市场。

尹鹏 (1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向电力系统通信技术、智能电网。