

计及潮流断面稳定限额的分区电网最大供电能力研究

刘盛松,秦旭东,汪志成,胡 伟
(江苏省电力公司调度控制中心,江苏 南京 210024)

摘 要:随着电网规模的迅速发展,电网分层分区随之深入,其中分区电网的最大供电能力(TSC)是电网规划与运行部门十分关注的一个问题。文中基于最优潮流提出了分区电网最大供电能力计算方法,将 TSC 转换为满足电网安全运行约束条件下的最优化问题,通过将关键输电断面稳定限额引入约束条件,间接在 TSC 中考虑了电网的 N-1/N-2 约束,最优化问题采用非线性内点法求解。通过对江苏电网的数值计算,结果表明,提出的分区电网最大供电能力计算方法是实用有效的。

关键词:分区电网;最大供电能力;最优潮流;内点法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)04-0005-05

随着我国经济的快速发展,用电负荷逐年攀升,同时,为了适应不断增长的用电需求,电网规模也不断扩大。以江苏电网为例,至 2014 年年底,电网装机容量突破 80 000 MW,220 kV 及以上的输电线路总长度超过 36 000 km,220 kV 及以上的变电容量超过 26 000 万 kV·A,已发展成为较大规模电网。

合理的电网结构,应满足分层分区的原则^[1]。合理分区,以受端系统为核心,将外部电源连接到受端系统,形成一个供需基本平衡的区域,并经联络线与相邻区域相连。随着高一级电压电网的建设,下级电网应逐步实现分区运行,相邻分区之间互为备用。江苏电网已形成以 500 kV 电网为骨干网架,220 kV 电网分区运行的格局。科学合理地评估分区电网最大供电能力对于电网规划与运行具有巨大的经济价值和现实意义。一方面研究 TSC 可以指导电网规划部门正确评价分区电网现状,分析制约分区电网供电能力的薄弱环节,通过进一步优化现有网架结构,挖掘已有电网在更高负载水平下运行的巨大潜力;另一方面,研究 TSC 可以为电网运行部门提供分区电网的供电裕度,为能否安排某一项电气设备检修提供依据,有利于科学地制定用电负荷高峰时段有序用电方案,确保电网运行的安全性与可靠性。

近年来,配电网的 TSC 研究^[2-5]逐渐引起人们广泛的关注,但作为电网运行的重要指标—分区电网 TSC 却少有文献论及。目前,实际应用中采取的方法为尝试近似法,即采用人工方法在分区电网现有负荷水平下逐次增加用电负荷,通过反复的潮流计算,逼近电网安全运行的极限,此时的用电负荷水平即为分区电网的 TSC。人工方法不仅计算繁琐,而且考虑的电网安全运行约束条件有限。本文建立了分区电网的 TSC 非线性最优化模型,将 TSC 作为目标函数,广义参数化潮流方程作为等式约束条件,发电机、输电线

路、变压器的安全运行作为不等式约束条件,同时约束条件还将关键输电断面稳定限额引入,间接在 TSC 中考虑了分区电网的 N-1/N-2 约束,TSC 计算模型更加符合电网运行实际,采用非线性内点法求解。

1 分区电网的 TSC 概念

分区电网通常由高一级电压等级主网与分区电网之间的联络变(受电通道)、分区内发电机组、输电线路、用电负荷构成。江苏苏州地区 220 kV 分区电网示意图如图 1 所示,每 1 个 220 kV 分区电网通过 1 座及以上 500 kV 变电站、2 台及以上 500 kV 主变受电。

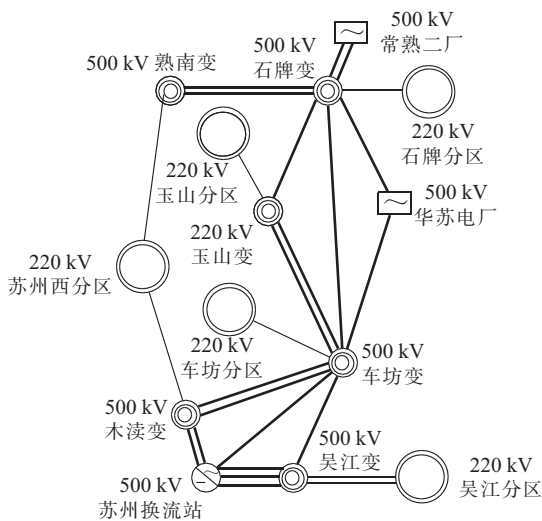


图 1 苏州地区 220 kV 分区电网示意图

分区电网 TSC 可以描述为:在满足分区电网安全运行准则条件下,分区内最大负荷供应能力。

通过分区电网的构成可以定性分析:TSC 受分区内发电机组出力、输电线路输送能力、通过与高一电压等级主网的联络变的受电能力等因素影响。

2 基于最优潮流的 TSC 数学模型

最优潮流问题^[6-10]数学上可描述为:在网络结构和参数给定的条件下,确定系统的控制变量,使得描述

系统运行效益的某一给定的目标函数取得最优,同时满足系统的运行和安全约束。

可以用简洁的数学形式描述为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x)=0 \\ h_1 \leq h(x) \leq h_u \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: x 包括系统控制变量和状态变量, $f(x)$ 为标量目标函数; $g(x)$ 为潮流方程等式约束; $h(x)$ 为不等式约束,分为变量不等式和函数不等式,常为系统的安全约束和元件的运行限值约束。

2.1 目标函数

考虑分区电网 TSC 的最优潮流目标函数则可以写为:

$$\min -\sum_{i \in R} P_{Li} \quad (2)$$

式(2)中: P_{Li} 为节点 i 的有功负荷; R 为所选择的分区电网负荷节点集合。

式(2)为分区电网最大负荷供应能力。

2.2 等式约束

等式约束为广义参数化潮流方程,分别为:

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_j V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$P_{Li} = P_{L0i} + \lambda b_{Pi}$$

$$Q_{Li} \text{ 按恒功率因数随 } P_{Li} \text{ 变化 } i \in R \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{L0i} \\ Q_{Li} = Q_{L0i} \end{cases} \quad i \notin R \quad (6)$$

式(3—6)中: P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为节点 i 常规发电机有功、无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 为节点 i 的有功、无功负荷; P_{L0i} 和 Q_{L0i} 为基态有功、无功负荷; λ 为负荷增长参数; b_{Pi} 为负荷增长方向; V_i 和 θ_i 为节点 i 的电压幅值、相角; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部元素; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部元素。

2.3 常规不等式约束

常规不等式约束包括发电机有功功率约束、无功功率约束、节点电压幅值约束、输电线路载流量约束,分别为:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (7)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad (8)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (9)$$

$$|I_{ij}| \leq I_{ij \max} \quad (10)$$

式(7—10)中: $P_{Gi \max}$, $P_{Gi \min}$, $Q_{Gi \max}$, $Q_{Gi \min}$ 为节点 i 发电机有功、无功功率上限及下限; $V_{i \max}$ 和 $V_{i \min}$ 为节点 i

电压幅值上限及下限; I_{ij} 为输电线路 $i-j$ 的电流值; $I_{ij \max}$ 为相应的限值。

2.4 关键输电断面稳定限额约束

输电断面是由电网中有功潮流流向一致的线路、变压器构成的,常见的形式有若干线路、变压器或由二者共同构成的。关键输电断面是结合电网实际运行情况选择与制定的,是实现复杂电网的降维控制。断面限额的编制依据是《电力系统安全稳定导则》以及相关安全稳定计算管理规定,稳定限额确定原则是考虑电网 N-1、N-2、直流闭锁等故障形式后电网能够保持静态稳定、暂态稳定与动态稳定。因此,关键输电断面已成为大电网的重要安全特征,调度运行中需严格控制关键输电断面潮流在稳定限额以内,确保电网安全稳定运行。关键输电断面稳定限额约束定义为:

$$F_{i \min} \leq F_i \leq F_{i \max} \quad i \in L \quad (11)$$

式(11)中: F_i 为关键输电断面; $F_{i \max}$ 和 $F_{i \min}$ 为第 i 个关键输电断面的上限、下限; L 为关键输电断面集合。

在分区电网 TSC 数学模型中考虑关键输电断面稳定限额约束,更加符合电网实际运行的需要,具有现实意义。

3 非线性内点法

基于最优潮流的 TSC 数学模型式(1)包含大量的等式和不等式约束,可以采用非线性内点法^[11,12]求解。内点法是 Lagrangian 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。非线性原—对偶内点法如下:

对于数学模型式(1),引入松弛向量 s_l 和 s_u , $s_l \geq 0$, $s_u \geq 0$, 式(1)重新写为:

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } g(x)=0 \\ h(x)+s_u=h_u \\ s_u+s_l=h_u-h_l \\ s_l \geq 0, s_u \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

引入对数障碍函数至目标函数,可以消去松弛变量的非负性约束,式(1)又可转化为如下形式:

$$\begin{cases} \min f(x) - \mu \sum_{l=1}^m \ln s_{li} - \mu \sum_{u=1}^m \ln s_{ui} \\ \text{s.t. } g(x)=0 \\ h(x)+s_u=h_u \\ s_u+s_l=h_u-h_l \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: m 为不等式约束的个数。引入 Lagrangian 乘子向量 λ, v, π , 形成 Lagrangian 函数:

$$L_\mu = f(x) - \lambda^T g(x) - v^T (h_u - h(x) - s_u) - \pi^T (h_u - h_1 - s_u - s_1) - \mu \sum_{i=1}^m \ln s_{li} - \mu \sum_{i=1}^m \ln s_{ui} \quad (14)$$

式(14)中:障碍参数 $\mu > 0$,随着算法迭代过程的进行,逐渐趋近于0。

根据 Kuhn-Tucker 最优性一阶必要条件,得到:

$$\begin{cases} f(x) - g(x)^T \lambda + h(x)^T v = 0 \\ v + \pi - \mu S_u^{-1} e = 0 \\ \pi - \mu S_1^{-1} e = 0 \\ -g(x) = 0 \\ h(x) + s_u - h_u = 0 \\ s_u + s_1 - h_u + h_1 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

这里, e 代表全部为1的 m 维向量, $s_u = \text{diag}(s_{u1}, s_{u2}, \dots, s_{um})$, $s_1 = \text{diag}(s_{11}, s_{12}, \dots, s_{1m})$ 。

Kuhn-Tucker 条件式(15)又可转化为如下形式:

$$\begin{cases} f(x) - g(x)^T \lambda + h(x)^T v = 0 \\ S_u (v + \pi) = \mu e \\ S_1 \pi = \mu e \\ -g(x) = 0 \\ h(x) + s_u - h_u = 0 \\ s_u + s_1 - h_u + h_1 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

令当前解为 $(x^k, s_u^k, s_1^k, \lambda^k, v^k, \pi^k)$,搜索方向为 $(\Delta x, \Delta s_u, \Delta s_1, \Delta \lambda, \Delta v, \Delta \pi)$,则新的迭代点为:

$$\begin{cases} x^{k+1} = x^k + \alpha_k \Delta x \\ s_u^{k+1} = s_u^k + \alpha_k \Delta s_u \\ s_1^{k+1} = s_1^k + \alpha_k \Delta s_1 \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha_k \Delta \lambda \\ v^{k+1} = v^k + \alpha_k \Delta v \\ \pi^{k+1} = \pi^k + \alpha_k \Delta \pi \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: α_k 为原变量和对偶变量的步长。

搜索方向可由求解下列系统方程得到:

$$\begin{bmatrix} S_u^{-1}(v+\pi) & 0 & I & I & 0 & 0 \\ 0 & S_1^{-1} & \pi & I & 0 & 0 \\ I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ I & 0 & 0 & 0 & \nabla h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nabla h^T & H & \nabla -g^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla -g^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s_u \\ \Delta s_1 \\ \Delta \pi \\ \Delta v \\ \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} =$$

$$- \begin{bmatrix} (V+\Pi)e - \mu S_u^{-1} e \\ \Pi e - \mu S_u^{-1} e \\ s_u + s_1 - h_u + h_1 \\ h(x) + s_u - h_u \\ \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \lambda + \nabla h(x)^T v \\ -g(x) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)中: H 为 Lagrangian 函数的 Hessian 矩阵; $V = \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_m)$; $\Pi = \text{diag}(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m)$ 。

系统方程(18)的获得,是由 Newton 方法求解 Kuhn-Tucker 最优性条件式(16)得出。为确保新的迭代点严格的正定,原对偶变量的步长可由下式确定:

$$\alpha_k = \min \left\{ 0.9995 \min_i \left\{ \frac{-s_{li}^k}{\Delta s_{li}} \left| \Delta s_{li} < 0, \frac{-s_{ui}^k}{\Delta s_{ui}} \left| \Delta s_{ui} < 0, \right. \right\}, 0.9995 \min_i \left\{ \frac{-\pi_i^k}{\Delta \pi_i} \left| \Delta \pi_i < 0, \frac{-(v_i + \pi_i)^k}{\Delta v_i + \Delta \pi_i} \left| (\Delta v_i + \Delta \pi_i) < 0 \right. \right\}, 1 \right\} \quad (19)$$

如果第 k 次迭代满足如下收敛判据,则迭代结束。

$$\begin{cases} \frac{g_{ap}}{1 + |d_{obj}|} \leq \varepsilon_1 \\ \|\text{the largest mismatch of Kuhn-Tucker}\| \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (20)$$

式(20)中: ε_1 和 ε_2 为给定的收敛判据; g_{ap} 为互补间隙。

$$g_{ap} = s_1^T \pi + s_u^T (v + \pi) \quad (21)$$

式(21)中: d_{obj} 为对偶目标函数值。

$$d_{obj} = f(x) - \lambda^T g(x) - v^T [h_u - h(x)] - \pi^T (h_u - h_1) \quad (22)$$

如果第 k 次迭代不满足收敛判据式(20),则修正障碍参数 μ :

$$\mu = \frac{g_{ap}}{4(n+m)^2} \quad (23)$$

式(23)中: n 为系统控制变量和状态变量的个数。

重复上述迭代过程直至满足收敛判据。

4 算例分析

以某年度江苏电网为例,选取了3个典型220 kV 分区电网—车坊分区、东龙分区、徐宿分区,对提出的基于最优潮流的分区电网最大供电能力计算方法进行了验证。

4.1 单座500 kV变电站受电的220 kV分区电网

220 kV 车坊分区示意图如图2所示。车坊分区电网规模及关键输电断面稳定限额分别如表1、表2所示。车坊分区 TSC 和相关约束条件值如表3所示。

由表3可见,500 kV 主变受电能力尚有一定裕度,但分区内机组出力已满发,220 kV 车坊—南施/星港双线潮流达到稳定限额,这2个因素成为制约 TSC

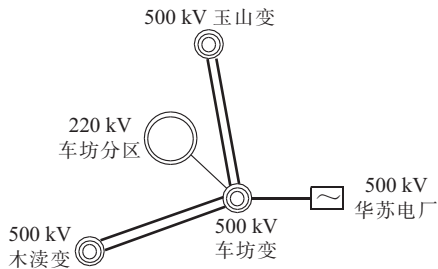


图 2 车坊分区

表 1 车坊分区电网规模

500 kV 变电站 / 座	500 kV 主变 / 台	装机容量 /MW	220 kV 变电站 / 座
1	3	360	12

表 2 车坊分区关键输电断面稳定限额

序号	关键输电断面	稳定限额 /MW
断面 1	500 kV 车坊 3 台主变	2500
断面 2	220 kV 车坊—姚慕双线	550
断面 3	220 kV 车坊—南施 / 星港双线	630

表 3 车坊分区 TSC 及相关约束信息

TSC/MW	机组出力 /MW	关键输电断面潮流 /MW	变电站电压 /kV
2402	360	断面 1 2247	227.5~228.9
		断面 2 502	
		断面 3 630	

进一步提高的因素，对电网规划与调度运行人员具有重要的指导意义。

4.2 2 座 500 kV 变电站受电的 220 kV 分区电网

220 kV 东龙分区示意图如图 3 所示。

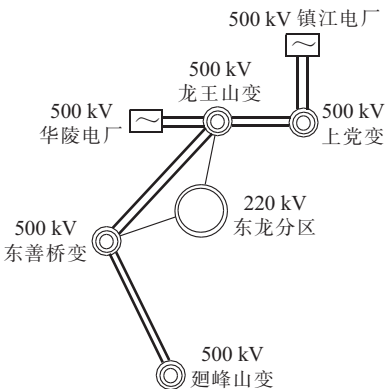


图 3 东龙分区

东龙分区电网规模及关键输电断面稳定限额分别如表 4、表 5 所示。东龙分区 TSC 相关的信息如表 6 所示。

表 4 东龙分区电网规模

500 kV 变电站 / 座	500 kV 主变 / 台	装机容量 /MW	220 kV 变电站 / 座
2	5	3540	37

由表 6 可见，TSC 达到最大值时，500 kV 东善桥主变、220 kV 晓庄—下关 / 中央门双线达到稳定限额，

表 5 东龙分区关键输电断面稳定限额

序号	关键输电断面	稳定限额 /MW
断面 1	500 kV 车坊 3 台主变	2000
断面 2	500 kV 龙王山 2 台主变	1550
断面 3	20 kV 晓庄—下关 / 中央门双线	650
断面 4	220 kV 西渡—龙王山 / 东阳三线	970

表 6 东龙分区 TSC 及相关约束信息

TSC/MW	机组出力 /MW	关键输电断面潮流 /MW	变电站电压 /kV
612.9	292.9	断面 1 2000	224.6~230.2
		断面 2 1365	
		断面 3 650	
		断面 4 591	

但分区内机组出力尚有 611 MW 未予释放，说明 220 kV 晓庄—下关 / 中央门双线成为电力输送瓶颈，制约了 TSC。

4.3 3 座 500 kV 变电站受电的 220 kV 分区电网

220 kV 徐宿分区示意图如图 4 所示。徐宿分区电网规模及关键输电断面稳定限额分别如表 7、表 8 所示。徐宿分区的 TSC 相关信息如表 9 所示。

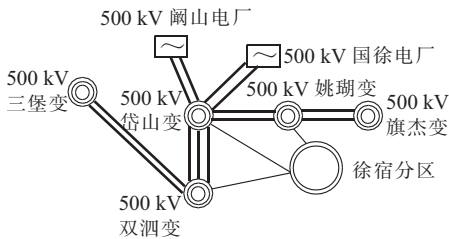


图 4 徐宿分区

表 7 徐宿分区电网规模

500 kV 变电站 / 座	500 kV 主变 / 台	装机容量 /MW	220 kV 变电站 / 座
3	6	1300	25

表 8 徐宿分区关键输电断面稳定限额

序号	关键输电断面	稳定限额 /MW
断面 1	500 kV 双泗 3 台主变	190
断面 2	500 kV 岱山 2 台主变	160
断面 3	500 kV 姚湖 1 台主变	90
断面 4	220 kV 双泗—南蔡三线	84

表 9 徐宿分区 TSC 及相关约束信息

TSC/MW	机组出力 /MW	关键输电断面潮流 /MW	变电站电压 /kV
4263	1300	断面 1 1585	223.2~230.7
		断面 2 866	
		断面 3 607	
		断面 4 840	

该分区 500 kV 主变受电能力尚有较大裕度，机组出力已达限值，220 kV 双泗—南蔡三线潮流达到稳定限额，制约了分区电力的进一步受进，是 TSC 的主要影响因素。

5 结束语

本文基于最优潮流,提出了分区电网最大供电能力计算方法。将TSC转化为满足电网安全运行约束条件下的最优化问题,约束条件中考虑了关键输电断面稳定限额,在对约束条件降维处理的同时计及了电网的N-1/N-2约束,由非线性内点法求得TSC。江苏电网3个典型220 kV分区电网算例的计算结果表明,采用的TSC计算方法能够满足电网规划与运行的要求,具有较高的适用性和实际应用价值。

参考文献:

- [1] DL/T 755—2001,电力系统安全稳定导则[S].
- [2] 肖峻,张婷,张跃,等.基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J].中国电机工程学报,2013,33(10):106-113.
- [3] 肖峻,刘世嵩,李振生,等.基于潮流计算的配电网最大供电能力模型[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5516-5524.
- [4] 肖峻,郭晓丹,王成山,等.配电网最大供电能力模型解的性质[J].电力系统自动化,2013,37(16):59-65.
- [5] 肖峻,李振生,刘世嵩,等.电压约束及网损对配电网最大供电能力计算的影响[J].电力系统自动化,2014,38(5):36-43.
- [6] 刘雪连,段振刚,王坚,等.考虑电压安全裕度的多目标最优潮流模糊建模[J].电网技术,2011,35(12):112-117.
- [7] 杨伟,滕百岸,孙磊.电力市场中最优潮流模型及算法研究[J].电网技术,2012,36(2):126-130.
- [8] 季聪,卫志农,汤涌,等.基于自动微分技术的VSC-HVDC内点法最优潮流[J].电网技术,2012,36(10):184-189.
- [9] 李静文,赵晋泉,张勇.基于改进差分进化—生物地理学优化算法的最优潮流问题[J].电网技术,2012,36(9):115-119.
- [10] 易驰韩,胡泽春,宋永华.考虑注入功率分布的随机最优潮流方法[J].电网技术,2013,37(2):367-371.
- [11] 杨林峰,简金宝,韩道兰,等.基于最优中心参数的多中心校正内点最优潮流算法[J].中国电机工程学报,2012,32(4):136-144.
- [12] 赵晓慧,阳育德,韦化.求解大规模AC/DC最优潮流的连续递推内点算法[J].中国电机工程学报,2013,33(4):171-178.

作者简介:

刘盛松(1974),男,吉林辽源人,高级工程师,从事电力系统计算与分析、运行方式管理工作;
秦旭东(1974),男,江苏扬州人,工程师,从事调度运行管理、电力系统计算与分析工作;
汪志成(1979),男,安徽黄山人,高级工程师,从事调度运行管理、电力系统计算与分析工作;
胡伟(1978),男,江苏常熟人,高级工程师,从事电力系统计算与分析、运行方式管理工作。

Study on Total Supply Capability of Zone Grids Considering Interface Flow Limits

LIU Shengsong, QIN Xudong, WANG Zhicheng, HU Wei

(Jiangsu Electric Power Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: With the rapid development of power grids, the management and dispatch for power systems are deeply done in a hierarchical and distributed manner. Total supply capability (TSC) of zone grids becomes a very important problem which has attracted many attention by power systems planning and operation departments. Optimal power flows based TSC calculation method is investigated in this paper. The TSC can be handled as a nonlinear programming problem, which satisfies certain physical and operating constraints. Critical interface flow limits are introduced in order to consider N-1/N-2 contingencies indirectly. The nonlinear interior point method is employed to calculate the TSC. Numerical results of Jiangsu power grid are presented. The proposed method is practical and effective.

Key words: zone grids; total supply capability; optimal power flow; interior point method

(上接第4页)

A Multi FACTS Coordinated Control Method for Improving System Stability Based on Sliding Mode Control

WANG Hualei¹, FU Xiangyun¹, TANG Yi², ZHANG Zhifu¹

(1.Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222004, China;

2.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As controllers of flexible AC transmission system (FACTS) in power system is designed independently, studies have shown that there exists negative cross-impact among these controllers. The effect of FACTS controllers is weakened due to negative cross-impact. A kind of multi FACTS coordinated controller is designed based on sliding mode control. The coordination of multi FACTS is achieved, and the control of multi FACTS is improved. Finally the time-domain simulation of a single-machine infinite-bus system with static var compensator (SVC) and thyristor controlled series capacitor (TCSC) is performed to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: multi FACTS; coordinated control; sliding mode control