

# 计及发电机调节能力的电压稳定约束最优潮流

刘方, 颜伟, 徐国禹

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 考虑了正常工况与重负荷工况下的系统静态安全运行约束, 以及系统由正常工况转移到重负荷工况时的发电机调节能力约束, 提出了一种计及电压稳定裕度的最优潮流模型。采用非线性原对偶内点法求解该模型, 可以同时得到正常工况下的最优发电机出力分配, 以及重负荷工况下的可行发电机出力分配。经 IEEE14 节点系统的仿真计算, 验证了本文提出的模型与算法。

**关键词:** 电压稳定; 最优潮流; 原对偶内点法

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)15-0029-06

## 0 引言

1962年, 法国学者 J. Carpentier 首先提出建立在严格数学模型基础上的最优潮流, 由于最优潮流能够统一考虑电力系统的经济性和安全性, 因此引起各国专家学者的极大兴趣, 得到了大量研究, 取得了可观的成果<sup>[1]</sup>。在传统的最优潮流中, 通常以电压水平作为系统电压静态安全的判据, 只要用户工作点的电压保持在指定范围内时, 就认为系统电压是静态安全的。当系统电压稳定问题不突出时, 这种只考虑基本运行约束条件的方法是适当的。然而, 随着电力系统负荷的持续增加, 以及电源与输电网络的投资建设比例失衡, 世界各国电力系统的运行点越来越接近电网的传输容量极限, 电力系统的电压稳定性问题逐渐凸显。

电压崩溃事件的屡屡发生, 引起电力工作者对电压失稳问题的广泛研究兴趣, 应用优化技术研究电压稳定问题是近年来的热点之一<sup>[2]</sup>。预防电压失稳的一个重要措施是在系统运行与规划时保留适当的电压稳定裕度, 因此电压稳定约束最优潮流 (Voltage stability constrained optimal power flow - VSC - OPF) 问题得到广泛研究。文献 [3] 基于模态分析法提出增加系统电压稳定裕度的有功、无功再分配模型, 以及最小切负荷模型。文献 [4] 基于模态分析法优化发电机和调相机的无功注入, 使电压稳定裕度最大化。文献 [5] 提出利用现有最优潮流工具, 分析电压失稳和 VSC - OPF 的方法。该方法将最优潮流作为原问题的子问题, 需要多次求解最

优潮流问题。文献 [6] 提出了电压稳定裕度最大化的优化模型, 以及计及电压稳定裕度的最优潮流模型, 使得原问题可以作为一个整体采用非线性原对偶内点法进行求解。文献 [7] 进一步提出了计及电压稳定裕度的多目标最优潮流模型。

在目前关于电压稳定约束最优潮流的文献中, 都假设发电机出力按照给定的参与因子随负荷的波动而线性变化。这种线性化的近似方法不完全符合发电机的实际调整过程, 而且如何确定参与因子仍缺乏足够的依据。在系统负荷增加的过程中, 可以通过最优潮流调节发电机出力, 使系统具有更好的电压稳定性及经济性。文献 [13] 基于负荷缓慢增长过程中系统始终保持在最优运行点的假设, 提出了延拓最优潮流方法。该方法结合延拓法和最优潮流内点法, 可以分析系统负荷不断增加时, 系统最优运行点的变化轨迹。受到文献 [13] 的启发, 本文在考虑系统负荷增加过程中发电机出力的调节时, 不再采用固定的参与因子, 而是允许发电机出力按照优化系统性能的原则进行调节。

由于发电机出力调节速度有限, 系统从正常工况转移到重负荷工况时, 发电机出力来不及调整到最优运行点, 甚至不一定能到达可行运行点 (即可能出现节点电压幅值越限, 或线路潮流越限)。本文以系统在重负荷工况下是否存在可行运行点为电压稳定判据, 同时考虑系统由正常工况转移到重负荷工况时发电机的调节能力约束, 建立了考虑电压稳定约束的最优潮流模型。采用原对偶内点法进行求解, 以 IEEE14 节点系统为例, 分析了电压稳定约束对系统经济运行的影响。算例结果表明, 当发电机调节能力约束为有效约束时, 系统将重新分配正

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50577073)

常工况下的发电功率,以经济性为代价来满足电压稳定性,达到预防电压崩溃的目的。

## 1 问题的提出

在电压稳定约束最优潮流的研究中,通常需要一系列假设,包括负荷增长方式和发电机出力的调整方式。负荷增长方式包括某节点负荷功率增加、某区域负荷功率增加、全部节点负荷增加等,对于具体的电力系统,通常由运行人员根据运行经验指定负荷增长方式。发电机有功和无功出力随着负荷的增长而增长,以维持功率平衡。在许多研究电压稳定约束最优潮流的文献中<sup>[5-12]</sup>,假设发电机出力呈线性化增长:

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0 + k_i P_G \quad (1)$$

其中:  $P_{Gi}$  为发电机  $i$  在重负荷工况下的有功出力,  $P_{Gi}^0$  为发电机  $i$  在正常工况下的有功出力,  $P_G$  是重负荷工况下系统总的有功出力增长量,系数  $k_i$  为发电机  $i$  的参与因子 ( $\sum k_i = 1$ )。

参与因子可以按发电容量分配<sup>[9]</sup>,也可以由发电机有功参与因子 APF(active participation factor)确定。在电力系统电压静态稳定分析的模态分析法<sup>[14]</sup>中,电力系统的线性化潮流方程可表示如下:

$$\begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_P & J_{PV} \\ J_Q & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设  $\bar{P} = 0$ , 有  $V = J_{QV}^{-1} \bar{Q}$ ; 假设  $\bar{Q} = 0$ , 有  $V = J_{RP}^{-1} \bar{P}$ 。其中,  $J_{QV} = J_{QV} - J_Q J_P^{-1} J_{PV}$  为降阶无功雅可比矩阵,  $J_{RP} = J_P - J_{PV} J_{QV}^{-1} J_Q$  为降阶有功雅可比矩阵。 $J_{QV}$  反应了无功功率对电压稳定的影响,  $J_{RP}$  则反应了有功功率对电压稳定的影响,  $J_{RP}$  和  $J_{QV}$  在 PV 曲线的鼻点(即静态电压稳定临界点)同时发生奇异。与无功参与因子的定义相似<sup>[14]</sup>, 假设  $\lambda_i$  为  $J_{RP}$  的最小特征值(模式  $i$  为最接近电压不稳定的模式),  $M_i$  为  $J_{RP}$  的第  $i$  列右特征向量,  $N_i$  为  $J_{RP}$  的第  $i$  行左特征向量, 则节点  $k$  对模式  $i$  的有功参与因子  $K_{ki}$  定义为  $K_{ki} = M_{ik} N_{ki}$ <sup>[15]</sup>。  $K_{ki}$  值的大小指示了节点  $k$  的有功出力对电压稳定性的影响,  $K_{ki}$  值较大的发电机节点增加有功出力, 可以较大程度地提高系统电压稳定性。

模态分析是一种线性分析方法, 而电力系统普遍存在着相当多的非线性因素, 尤其是发电机无功出力达到限制, 从 PV 节点转变为 PQ 节点时, 需要重新计算有功参与因子。同时, 文献[16]指出式(1)中  $k_i > 0$  的具有负荷响应能力的机组 (load fol-

lowing unit) 大约为系统全部可用机组的 20%, 即具有 AGC 的机组约占系统全部可用机组的 20%。

在电力系统负荷变化时, 可以通过发电计划的实时调整提高系统运行性能。在分析系统静态稳定性时, 仅考虑 AGC 机组自动调节功能, 可能会使分析结果偏于保守。因此, 本文在计及电压稳定约束的最优潮流模型中, 考虑了负荷增长过程中系统的发电出力的优化调整能力。

## 2 模型的建立

### 2.1 电压稳定约束

最优潮流立足于潮流方程, 是维持和提高系统静态安全性的重要工具。VSCOPF 主要从静态电压稳定性的角度提高系统电压稳定性, 首先考虑的问题是如何衡量系统电压稳定性, 或者说如何确定静态电压稳定临界点。目前应用的电压静态稳定指标多数是基于潮流方程的, 以雅可比矩阵奇异处为临界点。本文中同时考虑系统功率平衡和运行安全性, 以运行点位于静态安全域内为电压稳定判据。

以运行点位于静态安全域为电压稳定判据, 求解电压稳定极限的最优潮流模型为<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} & \max \\ & \text{s t} \\ & \left\{ \begin{array}{l} P_{Gi} - (1 + P_{Di}) P_{Di}^0 - \\ U_i \sum_{j \in S_N} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in S_N) \\ Q_{Gi} - (1 + Q_{Di}) Q_{Di}^0 - \\ U_i \sum_{j \in S_N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in S_N) \\ P_{Gi} \quad P_{Gi} \quad \bar{P}_{Gi} \quad (i \in S_G) \\ Q_{Gi} \quad Q_{Gi} \quad \bar{Q}_{Gi} \quad (i \in S_G) \\ U_i \quad U_i \quad \bar{U}_i \quad (i \in S_N) \\ S_{ij} \quad S_{ij} \quad \bar{S}_{ij} \quad (i \in S_L) \end{array} \right. \quad (3) \end{aligned}$$

其中:  $S_{ij}$  为线路  $ij$  的传输功率,  $S_N$  为系统所有节点集合,  $S_G$  为系统发电机节点集合,  $S_L$  为系统线路集合。  $P_{Di}^0$  和  $Q_{Di}^0$  ( $i \in S_N$ ) 为正常工况的有功、无功负荷,  $P_{Di}$  和  $Q_{Di}$  ( $i \in S_N$ ) 为有功负荷和无功负荷的增长方向。等式约束为广义参数化潮流方程, 不等式约束为系统静态安全运行约束。

以负荷增长参数  $\alpha$  作为电压稳定裕度, 将电压稳定指标以约束的形式嵌入传统最优潮流模型, 可形成如下 VSC - OPF 问题<sup>[17]</sup>:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{s t} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} g(x) = 0 \\ \underset{\max}{h} \leq h(x) \leq \bar{h} \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $x$  为系统状态变量;  $f$  为传统最优潮流的目标函数;  $g$  和  $h$  分别为传统最优潮流的等式约束和不等式约束;  $\max$  为系统电压稳定裕度指标, 即模型 (3) 的目标函数;  $\bar{h}$  为电压稳定阈值。

模型 (4) 中的电压稳定约束也可以表述为 0-1 判据<sup>[10]</sup>: 在给定的重负荷工况下, 如果系统存在可行运行点, 则认为当前系统满足电压稳定约束, 否则系统不满足电压稳定约束。重负荷工况可以由  $P_{Di}$ 、 $Q_{Di}$  直接给定, 也可以在  $P_{Di} = (1 + \max P_{Di}) P_{Di}^0$ 、 $Q_{Di} = (1 + \max Q_{Di}) Q_{Di}^0$  的基础上由电压稳定阈值  $\max$  给定。

## 2.2 发电机调节能力约束的引入

根据功率平衡的原则, 要改变发电机的有功出力, 必须改变原动机提供的动力转矩, 这一改变可通过调节水轮机的进水量或汽轮机的汽门来实现。此外, 对于汽轮机而言, 在发电机启动阶段需要锅炉预热过程, 在关机阶段需要冷却过程。由于以上各种物理约束, 发电机出力功率的升高和降低不是瞬时完成的, 通常将发电机在指定时间段内能升高或降低的最大功率值称为爬坡速率。

在 VSC-OPF 模型 (4) 中, 当负荷增加时, 发电机有功和无功出力随之增长, 但是不同于直接指定发电机出力增长系数<sup>[9]</sup>, 本文仅考虑发电机调整能力的限制, 即只要求发电机出力调整是可实现的。这种方式显然更为灵活, 体现了运行人员根据负荷变化调整发电机出力的过程。当系统负荷增加时, 发电机调节能力受到爬坡速率的限制, 可能不能及时达到最优运行状态, 甚至不能满足系统运行约束, 从而大大削弱系统的电压稳定性。因此, 有必要在电压稳定约束最优潮流模型中计及发电机调节能力的影响。

## 2.3 计及发电机调节能力的 VSC-OPF 模型

结合传统最优潮流模型与电压稳定约束, 同时考虑正常工况和重负荷工况下的各种静态安全运行约束, 以及系统由正常状态转移到重负荷状态时发电机的调节能力约束, 本文建立了计及发电机调节能力的电压稳定约束最优潮流模型:

### 1) 目标函数

正常工况下系统发 购电成本最小

$$\min \sum_{i \in S_a} (a_i (P_{Gi}^0)^2 + b_i P_{Gi}^0 + c_i) \quad (5)$$

### 2) 潮流平衡约束

正常工况下的潮流方程

$$P_{Gi}^0 - P_{Di}^0 - U_i^0 \sum_{j \in S_N} U_j^0 (G_{ij} \cos \theta_{ij}^0 + B_{ij} \sin \theta_{ij}^0) = 0$$

$$Q_{Gi}^0 - Q_{Di}^0 - U_i^0 \sum_{j \in S_N} U_j^0 (G_{ij} \sin \theta_{ij}^0 - B_{ij} \cos \theta_{ij}^0) = 0$$

(6)

重负荷工况下的潮流方程

$$P_{Gi} - P_{Di} - U_i \sum_{j \in S_N} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - U_i \sum_{j \in S_N} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

(7)

### 3) 静态安全运行约束

正常工况下的静态安全运行约束

$$\begin{cases} P_{Gi} & P_{Gi}^0 & \bar{P}_{Gi} & (i \in S_G) \\ Q_{Gi} & Q_{Gi}^0 & \bar{Q}_{Gi} & (i \in S_G) \\ U_i & U_i^0 & \bar{U}_i & (i \in S_N) \\ S_{ij} & S_{ij}^0 & \bar{S}_{ij} & (i \in S_L) \end{cases} \quad (8)$$

重负荷工况下的静态安全运行约束

$$\begin{cases} P_{Gi} & P_{Gi} & \bar{P}_{Gi} & (i \in S_G) \\ Q_{Gi} & Q_{Gi} & \bar{Q}_{Gi} & (i \in S_G) \\ U_i & U_i & \bar{U}_i & (i \in S_N) \\ S_{ij} & S_{ij} & \bar{S}_{ij} & (i \in S_L) \end{cases} \quad (9)$$

### 4) 负荷增长方式约束

$$P_{Di} = (1 + \max P_{Di}) P_{Di}^0 \quad (i \in S_N) \quad (10)$$

$$Q_{Di} = (1 + \max Q_{Di}) Q_{Di}^0 \quad (i \in S_N)$$

### 5) 发电机调节能力约束

$$P_{Gi}^0 - P_{Gi} \leq P_{Gi} - P_{Gi}^0 \leq P_{Gi}^0 + P_{Gi} \quad (i \in S_G) \quad (11)$$

其中: 电压稳定裕度指标  $\max$  为给定的阈值, 式 (5)、(6)、(8) 为传统的最优潮流模型。根据电压稳定约束最优潮流模型, 可以同时确定正常工况下的最优发电机出力  $P_{Gi}^0$ 、 $Q_{Gi}^0$ , 以及重负荷工况下的可行发电机出力  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ 。正常工况下发电机出力能使系统静态安全经济运行, 当负荷在指定的方式下增长  $\max$  后, 将发电机出力调节到  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ , 可以使系统在重负荷工况下继续保持静态安全运行。

当式 (11) 为非积极约束时, 最优结果与传统最优潮流的结果一致。此时, 发电机在正常工况下处于最经济状态, 当系统转移到重负荷工况  $\max$  时, 发电机有充足的能力转移到重负荷工况下的可行状态。当式 (11) 为积极约束时, 如果发电机在正常工况下仍处于最经济状态, 那么当系统转移到重负荷工况时, 发电机由于爬坡速率的限制, 不可能保持系

统重负荷工况为可行状态。因此,必须改变发电机在正常工况下的出力,使其能够应付可能出现的重负荷工况。

### 3 原对偶内点算法实现

采用  $x^0$   $R^n$  表示正常工况下的系统参数,  $x$   $R^n$  表示重负荷工况下的系统参数,  $g$   $R^n$   $R^p$  表示系统潮流方程,  $h$   $R^n$   $R^m$  表示系统静态安全运行约束函数,  $h_*$   $R^{2n}$   $R^r$  表示发电机调节能力约束函数,则计及电压稳定裕度的最优潮流可以表示为以下非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min & f(x^0) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} g(x^0) = 0 \\ g(x) = 0 \\ \underline{h} \leq h(x^0) \leq \bar{h} \\ \underline{h} \leq h(x) \leq \bar{h} \\ \underline{h}_* \leq h_*(x^0, x) \leq \bar{h}_* \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

该模型是最优潮流模型的扩展,其本质仍然是非线性数学规划问题。本文采用原对偶非线性内点法进行求解<sup>[19]</sup>,首先通过松弛变量将不等式约束转化为等式约束,在目标函数中引入对数壁垒函数来处理松弛变量的非负性约束,然后形成拉格朗日函数,推导拉格朗日函数的 KKT 条件,采用牛顿法迭代求解得到最优解。

### 4 算例分析

以 IEEE 14 节点系统为例,基准功率为 100 MVA,系统包含 20 条支路、5 台发电机,发电机参数见表 1。采用传统最优潮流模型求得正常工况下系统最小的发 购电成本为 440.71 \$,发电机有功出力见表 2 中的 Case1。

表 1 发电机参数

Tab 1 Parameter of generator

| 发电机<br>节点 | 有功 / pu     |       | 发 购电成本系数 /100 \$ |      |     |
|-----------|-------------|-------|------------------|------|-----|
|           | $\bar{P}_G$ | $P_G$ | $a$              | $b$  | $c$ |
| 1         | 0.1         | 2.5   | 0.02             | 2    | 0   |
| 2         | 0.1         | 2     | 0.0175           | 1.75 | 0   |
| 3         | 0.05        | 0.6   | 0.0625           | 1    | 0   |
| 6         | 0.05        | 0.5   | 0.0083           | 3.25 | 0   |
| 8         | 0.05        | 0.6   | 0.025            | 3    | 0   |

假设负荷保持功率因子不变、同比例增长,即, ( $P_{D_i} = 1, Q_{D_i} = 1 (i \in S_N)$ ), 电压稳定极限模型 (3) 求解系统最大电压稳定裕度为 0.8254, 临界负荷下发电机有功出力见表 2 中的 Case2。

采用调节能力参数  $\alpha$  表示爬坡速率,即发电机在负荷增加的过程中,有功注入功率的调节量最多只能为有功总容量的  $\alpha$  倍:  $P_{Gi} = \bar{P}_{Gi} (\alpha S_G)$ 。当发电机调节能力参数  $\alpha = 0.15$ , 电压稳定裕度  $\gamma = 0.3$  时,求解计及电压稳定裕度的最优潮流模型,得到正常工况下系统发 购电成本为 442.63 \$, 正常工况下发电机有功出力为表 2 中的 Case3, 重负荷工况下发电机有功出力为表 2 中的 Case4。

表 2 发电机有功出力

Tab 2 Active power output of generator

| 节点 | Case1  | Case2  | Case3   | Case4   |
|----|--------|--------|---------|---------|
| 1  | 0.1    | 1.6641 | 0.20633 | 0.58133 |
| 2  | 1.8359 | 1.5147 | 1.7288  | 2       |
| 3  | 0.6    | 0.6    | 0.6     | 0.6     |
| 6  | 0.05   | 0.5    | 0.05    | 0.12499 |
| 8  | 0.05   | 0.6    | 0.05    | 0.13999 |

注: Case1 为传统最优潮流结果; Case2 为电压稳定极限点; Case3 为 VSC - OPF 求解的正常工况; Case4 为 VSC - OPF 求解的重负荷工况

由表 2 可观察到 Case1 与 Case3 不相同,这意味着在电压稳定约束最优潮流中,正常工况下的最优发电机出力 Case3 不同于传统的经济分配方式 Case1,这是因为 Case3 受到了发电机调节能力和电压稳定约束的限制。

对 Case3 和 Case4 分析可知,发电机节点 1、6、8 的调节量已经达到发电机调节能力上限。如果在正常工况下发电机按 Case1 出力,则在给定的发电机调节能力约束下,不可能在重负荷工况下调整到可行运行状态。为了满足电压稳定裕度约束,只能使正常工况下的发电机出力偏离最优状态,保留足够的调节能力。

可见,计及发电机调节能力的电压稳定约束最优潮流是以一定的正常运行经济性为代价,换取了系统的电压稳定性。

#### 4.1 电压稳定裕度的影响

假设发电机调节能力参数  $\alpha = 0.2$ , 改变电压稳定裕度  $\gamma$ , 求解计及电压稳定裕度的最优潮流模型,得到的结果如图 1。由图可见,当  $\gamma = 0.32$  时,优化结果与不考虑电压稳定约束的传统最优潮流模型的结果完全相同,表明在发电机调节能力约束下,传统最优潮流模型的最优解能够顺利过渡到重负荷工况下的静态安全运行状态。

当  $\gamma = 0.33 \sim 0.44$  时,随着  $\gamma$  的增长,机组 1 出力逐渐增大,机组 2 出力逐渐减小,系统总的发 购电成本不断增加。这表明,当电压稳定约束起作用

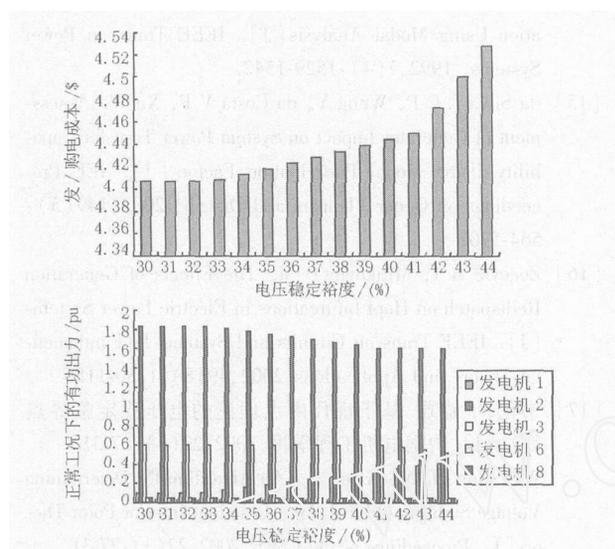


图 1 电压稳定裕度的影响

Tab 1 Effect of voltage stability margin

用时,为了保证系统在重负荷工况下满足静态安全约束,必须调整机组在正常工况下的有功出力,相应会使系统在正常工况下的发电成本增加。也就是说,在机组调节能力一定时,若希望拥有较高的电压稳定裕度,可能会牺牲正常工况时的经济性。

当  $\alpha = 0.45$  时,优化问题无解,表明电压稳定约束要求过高,不能同时保证系统正常工况和重负荷工况的静态安全约束。

#### 4.2 发电机调节能力的影响

假设电压稳定裕度  $\alpha = 0.3$ ,改变发电机调节能力参数,求解计及电压稳定裕度的最优潮流模型,得到的结果如图 2。

由图可见,当发电机调节能力较大,即  $\beta = 0.18$  时,求解结果与传统最优潮流的结果完全相同,此时电压稳定约束不起作用;当  $\beta = 0.12$  ~  $0.17$  时,发 / 购电成本随发电机调节能力的减小而增大,发电机调节能力约束为积极约束,正常工况下的机组出力偏离最经济状态;当  $\beta = 0.11$  时,优化问题无解,表明机组的调节能力不足以同时保证系统正常工况和重负荷工况的静态安全约束。

### 5 结语

本文考虑了发电机的调节能力,以重负荷工况下是否存在可行运行点为电压稳定判据,建立了计及电压稳定性的最优潮流模型。模型中同时考虑了正常工况与重负荷工况下的各种静态安全运行约束,把电压稳定问题与最优潮流问题结合在一个非

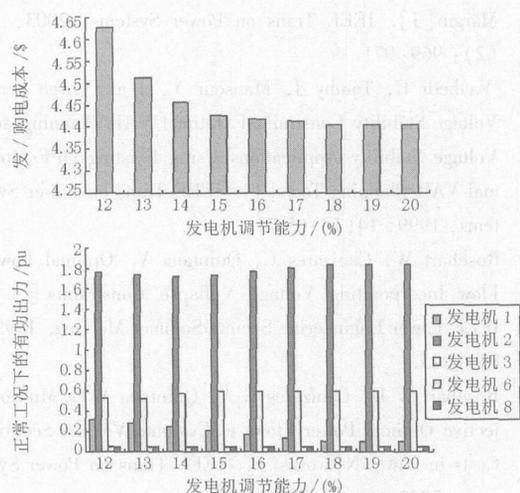


图 2 发电机调节能力的影响

Tab 2 Effect of generator regulation capacity

线性规划问题中。通过调节正常工况和重负荷工况的发电机出力,该模型可以在预防重负荷工况下的电压失稳的同时,提高正常工况下的系统运行经济性。

采用原对偶内点法进行仿真计算的结果表明,当电压稳定约束起作用时,系统需要的电压稳定裕度越大,正常工况下的运行经济性越差;同时,发电机调节能力越小,正常工况下的发 / 购电成本越大。仿真结果符合系统运行经验,有助于更恰当地考虑发电机对系统电压稳定和经济运行的影响。

本文提出的模型同时考虑了系统正常工况和重负荷工况的静态安全性,以及发电机调节能力。该模型具有最优潮流模型的灵活性,可以根据需要选择不同的目标函数和运行约束,进一步研究电压稳定校正控制、 $N-1$  电压稳定问题,以及电力市场环境下的电压稳定运行问题。

#### 参考文献:

- [1] Momoh J A, Adapa R, El-Hawary M E. A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 96-111.
- [2] Momoh J A, Koessler R J, Bond M S, et al. Challenges to Optimal Power Flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 444-455.
- [3] Affonso CM, da Silva L C P, Lima F G M, et al. Optimal MW/MVAR Dispatch and Minimal load Shedding Strategy for Improving Voltage Stability Margin [A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003.
- [4] Menezes T V, da Silva L C P, da Costa V F. Dynamic VAR Sources Scheduling for Improving Voltage Stability

- Margin [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 969-971.
- [5] Vaahedi E, Tamby J, Mansour Y, et al Large Scale Voltage Stability Constrained Optimal VAR Planning and Voltage Stability Applications Using Existing OPF/Optimal VAR Planning Tools[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (1): 65-74.
- [6] Rosehart W, Canizares C, Quintana V. Optimal Power Flow Incorporating Voltage Collapse Constraints [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999. 820-825.
- [7] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 578-587.
- [8] Song H, Lee B, Kwon S H, et al Reactive Reserve-based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability Margins [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (4): 1538-1546.
- [9] Lin X, David A K, Yu C W. Reactive Power Optimization with Voltage Stability Consideration in Power Market Systems [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 2003, 150 (3): 305-310.
- [10] Vaahedi E, Mansour Y, Fuchs C, et al Dynamic Security Constrained Optimal Power Flow/VAR Planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16 (1): 38-43.
- [11] Milano F, Canizares C A, Invernizzi M. Multiobjective Optimization for Pricing System Security in Electricity Markets [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 596-604.
- [12] Capitanescu F, van Cutsem T Preventive Control of Voltage Security Margins: a Multicontingency Sensitivity-based Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (2): 358-364.
- [13] Almeida K C, Salgado R. Optimal Power Flow Solutions Under Variable Load Conditions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (4): 1204-1211.
- [14] Gao B, Morison G K, Kundur P. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7 (4): 1529-1542.
- [15] da Silva L C P, Wang Y, da Costa V F, Xu W. Assessment of Generator Impact on System Power Transfer Capability Using Modal Participation Factors [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 2002, 149 (5): 564-570.
- [16] Zecevic A I, Miljkovic D M. The Effects of Generation Redispatch on Hopf bifurcations in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications, 2002, 49 (8): 1180-1186.
- [17] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 27-31.  
WEI Hua, DING Xiao-ying An Algorithm for Determining Voltage Stability Critical Point Based on Interior Point Theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (3): 27-31.
- [18] Venkatasubramanian V, Schattler H, Zaborsky J. Dynamics of Large Constrained Nonlinear Systems—A Taxonomy Theory Power System Stability [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83 (11): 1530-1561.
- [19] Wu Y C, Debs A S, Marsten R E. A Direct Nonlinear Predictor-corrector Primal-dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flows [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (2): 876-883.
- [20] Irisarri G D, Wang X, Tong J, Mokhtari S. Maximum Loadability of Power Systems Using Interior Point Nonlinear Optimization Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 162-172.

收稿日期: 2006-01-02; 修回日期: 2006-04-03

作者简介:

刘方 (1979 -), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化运行; E-mail: eeliuf@pkyu.edu.hk

颜伟 (1968 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统优化运行与控制方面的研究;

徐国禹 (1927 -), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。

### Voltage stability constrained optimal power flow considering generator ramp-rate limits

LIU Fang, YAN Wei, XU Guo-yu

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In this paper, voltage stability constrained optimal power flow (VSCOPF) with the generator ramp-rate limits consideration is formulated, in which the operational limits at the defined heavy loading point are considered as well as the operational limits at the current loading point. The VSCOPF problem is solved by the nonlinear version of the interior point method. The optimal power dispatch at the current loading point and the feasible power dispatch at the defined heavy loading point are simultaneously obtained. The proposed methodology is tested on the IEEE 14 bus system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577073)

**Key words:** voltage stability; optimal power flow; primal dual interior point method