

# 基于半张量积方法与准稳态时域仿真的 电力系统中长期电压稳定分析

王义红<sup>1</sup>, 梅生伟<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

## Analysis of Long- and Medium-Term Power System Voltage Stability Based on Semi-Tensor Product and Quasi-Steady-State Time Domain Simulation

WANG Yihong<sup>1</sup>, MEI Shengwei<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** A method to judge medium- and long-term voltage stability, which integrates the non-linear dynamic stability margin index based on semi-tensor product with quasi-steady state (QSS) time domain simulation, is proposed and a medium- and long-term voltage stability analysis model is built. The built model turns the short-term dynamic balance equations into algebraic equations, thus the complexity of computation of Jacobian matrix and Hessian matrix during solving stability margin index can be reduced. On this basis, the medium- and long-term voltage stability index based on semi-tensor product is used to analyze medium- and long-term voltage stability. The effectiveness of the proposed method is verified by simulation results of New England 10-machine 39-bus system.

**KEY WORDS:** medium- and long-term voltage stability; semi-tensor product; quasi-steady-state (QSS) time domain simulation

**摘要:** 提出了综合基于半张量积方法的非线性动力学稳定裕度指标与准稳态时域仿真的中长期电压稳定判定方法。建立了中长期电压稳定分析模型。该模型将短期动态平衡方程转化为代数方程, 降低了求解稳定裕度指标过程中雅可比矩阵以及海森矩阵的计算复杂度。在此基础上, 利用基于半张量积方法的中长期电压稳定指标分析中长期电压稳定性。新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 中长期电压稳定; 半张量积方法; 准稳态时域仿真

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977047)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50977047).

## 0 引言

随着电压稳定问题日益突出, 电压稳定机制、稳定指标及中长期仿真的研究得到特别关注, 并取得了较大的发展<sup>[1-6]</sup>。通常电力系统长过程动态响应的时域常数从几十 ms 到 100s 以上, 系统呈现典型刚性, 故需要采用数值稳定性高的算法。加之计算时间和速度的要求, 还应考虑采取措施提高计算效率<sup>[7-11]</sup>。目前关于中长期过程电压稳定性的仿真计算方法有: 1) 同时考虑暂态过程和中长期过程的全过程时域方法; 2) 将暂态过程用其准稳态模型替代的计算方法。

针对中长期数值积分的算法问题, 近年来逐步达成共识, 即采用基于隐式法的稳定性好的算法, 这样才能在大时步、强刚性以及多次迭代的情况下保证计算的正确性。在针对电力系统长期过程稳定性的计算中, 应用了更多数值计算领域的最新研究成果, 如 Adam-BDF 算法<sup>[12]</sup>、GEAR 法<sup>[11,13]</sup>以及混合算法<sup>[11,13-15]</sup>, 但由于这些仿真算法并不专门针对电压稳定计算, 故无法直接推广应用。

为解决此问题, 针对中长期电压稳定研究, 文献[16-17]提出了准稳态(quasi-steady-state, QSS)时域仿真法, 其基本原理是用一系列由长期动态过程驱动的短期平衡点来近似模拟系统的长期时间响应过程, 这种做法实际上是静态潮流计算和全过程时域仿真计算的一种折衷。QSS 仿真的基本前提是: 假设系统暂态过程稳定且足够快以致于可以用

其平衡点来代替, 这些系统只保留那些与中长期过程相关的动态方程。在此前提下, 文献[18]分析了常用系统模型在 QSS 仿真中的适用情况, 完善了进行 QSS 仿真的系统模型和元件模型, 提出了适用于不同系统的 QSS 仿真方法。在分析系统的中长期电压安全稳定时, 因为控制时间间隔相对较长, 且系统状态变化比较缓慢, 从而难以迅速准确地判断系统稳定性。为此文献[19]首先将系统的状态微分方程线性化, 通过对相应的微分-代数系统的特征值进行分析, 判断系统的稳定性。但该方法本质上仍然是基于特征根方法的静态电压判据, 没有充分计及中长期电压稳定的负荷动态, 例如综合自恢复负荷模型等。

文献[20-21]在理论上证明了一类非线性系统稳定域边界满足的充分必要数学条件, 提出一种基于半张量积方法的非线性系统稳定域边界的 2 阶逼近算法。与其他稳定域边界近似算法相比, 该算法无需作任何形式的坐标变换, 也无需求解全部的特征根和特征向量, 因而是一种能够保证精度的便捷的确定稳定域边界的数值算法。文献[22-24]将文献[20-21]的理论成果分别应用于暂态功角稳定与暂态电压稳定, 建立了基于稳定域边界 2 阶逼近的暂态功角与暂态电压稳定分析方法。但该方法在求解暂态电压稳定时, 假定暂态功角问题不存在, 无形中将暂态电压稳定问题与暂态功角稳定问题解耦, 其假设太过强烈。事实上, 实际系统中的暂态电压失稳往往伴随着暂态功角失稳, 它们属于同一时间框架。此外, 半张量积方法是一种非线性系统的矩阵方法, 在应用半张量积方法求解电力系统稳定域边界的过程中, 随着系统阶数的升高, 半张量积方法的中间计算结果所产生的矩阵阶数也迅速增大, 限制了将半张量积方法直接应用于实际电力系统。因而文献[22-24]所提方法很难应用于复杂系统。

本文在文献[24]的基础上进行拓展与延伸, 讨论并提出一种中长期电压稳定分析的快速评估方法。其主要思路是, 在 QSS 仿真技术的基础上, 充分考虑中长期电压稳定的负荷动态, 结合基于半张量积方法的稳定域理论, 构建一种方便、快捷、无需进行故障后时域仿真的 QSS 裕度指标并给出其相应的计算方法。

## 1 QSS 仿真基本原理

对于中长期电压失稳, 准稳态近似模型能够捕

捉发电机及励磁系统的关键特征。在 QSS 模型中, 发电机及励磁系统的快动态予以忽略, 取而代之的是它们的平衡方程。QSS 模型可以描述为以下的连续离散混成微分代数方程组<sup>[14-15]</sup>

$$0 = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1)$$

$$0 = g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = h_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = h_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (4)$$

式中: 式(1)(2)分别是发电机暂态和网络关系平衡方程;  $\mathbf{x}$  为与发电机和调节器相关的状态变量;  $\mathbf{y}$  为系统代数变量组成的向量; 式(3)(4)描述了系统的中长期动态过程, 如带负载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)、发电机最大励磁限制器(maximum excitation limit, MXL)动作和二次电压控制等, 其中  $\mathbf{z}_c$  代表连续变量,  $\mathbf{z}_d$  代表离散变量。

QSS 仿真计算的基本过程见图 1。图 1 中曲线上的点代表暂态平衡点, 即式(1)(2)的解。平衡点的跳变(如 A 到 A'、B 到 B')代表扰动或离散元件的动作, 如线路开断、负荷突增、OLTC 动作、MXL 动作等。图 1 中曲线 A'B、B'C 由系统中连续的动态过程驱动, 即式(3)所描述的动态过程, 或由系统中参数的缓慢变化引起, 如负荷需求的持续增加。中长期动态元件的过程由式(3)(4)描述, 离散动态元件的动作效果可体现在 AA'、BB' 的跳变上, 连续动态元件的动作效果可体现在 A'到 B、B'到 C 的变化过程中。

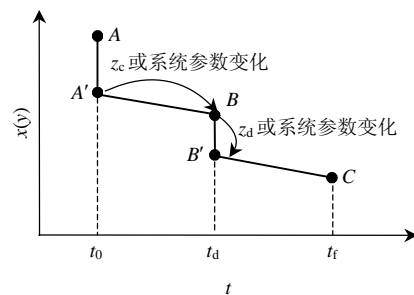


图 1 准稳态仿真基本过程

Fig. 1 The process of QSS simulation

本文采用隐式梯形法求解 QSS 模型, 将微分方程(3)差分化后, 以潮流解作为系统初值, 求出系统中发电机、励磁器以及动态负荷等元件的初始状态; 进一步观察是否有离散装置动作, 若有则根据方程(4)得到  $\mathbf{z}_d(k+1)$ , 然后利用牛顿法求解微分方程(3)差分化方程与(1)及(2)的联立方程, 求出下一个时刻的各状态量以及代数量, 此处代数量包含了发电机以及励磁器的变量。具体求解流程如图 2 所示。

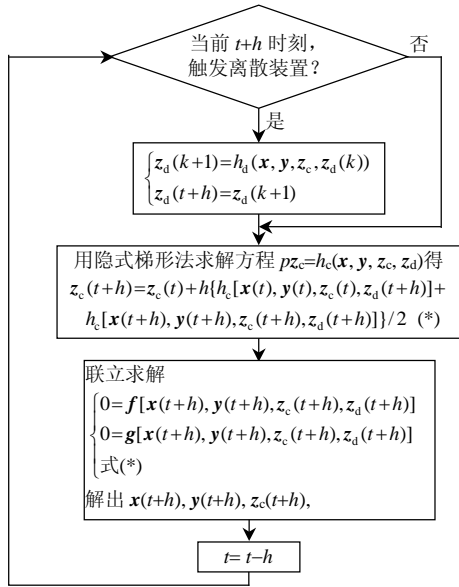


图 2 隐式梯形法求解准稳态模型的求解流程  
Fig. 2 Flow chart of solving QSS model based on the implicit trapezoidal rule

## 2 系统模型

电力系统长期动态元件, 如 OLTC 模型详见文献[25]以及广义自恢复负荷模型详见文献[26]。

电网中短期动态元件, 如同步发电机模型以及自动电压调节器模型经 QSS 近似后, 其微分方程转化为平衡方程, 模型具体内容可参见文献[25]。输电网模型详见文献[23]。

综合上述模型即构成分析扰动后系统中长期电压稳定问题的基本模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x} = [\dots, n_i, z_{pi}, z_{qi}, \dots]^T$ , 指有载调压变压器及广义自恢复负荷的状态变量;  $\mathbf{y} = [\dots, E'_{di}, E'_{qi}, \delta_i, \omega_i, E'_{fdi}, U_{Ri}, U_{Fi}, U_i, \theta_i, \dots]^T$  则包括发电机及励磁系统等快动态元件和网络的代数变量。

## 3 中长期电压稳定判据

前面已经提到, 在应用基于半张量积方法的稳定裕度指标时, 随着系统阶数的升高, 半张量积方法的中间计算结果所产生的矩阵阶数也迅速增大, 从而限制了将半张量积方法直接应用于大型电力系统。然而在中长期电压稳定模型中, 由于采用了 QSS 时域仿真模型, 使得大量的微分变量变成了代数变量, 即整个系统的微分方程阶数大大降低, 这样无论是求解雅可比矩阵, 还是海森矩阵以及二次项系数  $\mathbf{Q}$  矩阵, 都大大降低了计算难度。

需要说明的是, 虽然稳定裕度指标的出发点是

纯微分方程, 但因为半张量积方法强大的兼容性, 使得它可以推广至微分代数方程。下面将给出求解微分代数方程系统(针对文献[24]中式(5)(6))的雅可比以及海森矩阵的方法<sup>[20]</sup>。

如果潮流方程  $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{0}$  有解, 假设  $\mathbf{x}_u$  是 DAE 系统的 I 型不稳定平衡点,  $\mathbf{y}_u$  是与之对应的代数量。记  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  的雅可比矩阵为  $\mathbf{J}$ , 则有

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) \left[ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u)$$

$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  的第  $i$  个分量  $f_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  的海森矩阵为

$$\begin{aligned} H_i = & \frac{\partial^2 f_i}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right) - \left\{ \left[ \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) \right]^T \mathbf{Y} + \mathbf{X} \right\} \cdot \\ & \left\{ \left[ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) \right]^T \otimes \mathbf{I}_n \right\} (\nabla_y f_i \otimes \mathbf{I}_n) + \\ & \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right)^T \left[ \frac{\partial^2 f_i}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 f_i}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{y}} \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right] \end{aligned}$$

式中  $\nabla_y f_i$  表示  $f_i$  对变量  $\mathbf{y}$  的偏微分,  $\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} = \left[ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u) \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u)$ ,  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  为

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \left[ \left( \frac{\partial^2 g_1}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 g_1}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right), \dots, \left( \frac{\partial^2 g_m}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 g_m}{\partial \mathbf{x} \partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right]_{(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u)} \\ \mathbf{Y} = \left[ \left( \frac{\partial^2 g_1}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 g_1}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right), \dots, \left( \frac{\partial^2 g_m}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^2 g_m}{\partial \mathbf{y} \partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}} \right) \right]_{(\mathbf{x}_u, \mathbf{y}_u)} \end{cases}$$

求得雅可比矩阵和海森矩阵后, 就可以应用文献[24]中式(4)计算稳定域边界的二次近似。为方便后面的计算, 这里重新写出

$$h_Q(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\eta}^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}_u) + \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_u)^T \mathbf{Q} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_u) \quad (6)$$

式中一次项系数  $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m]^T$  可由雅可比矩阵求得, 而二次项系数  $\mathbf{Q}$  可在得到海森矩阵后由文献[24]中式(6)求得, 此处不再赘述。

电力系统中长期电压稳定性可由故障切除后初始状态和故障后稳定平衡点与系统故障后电压稳定域边界的相对位置关系来确定。即如果故障后的初始状态和故障后的稳定平衡点都在电压稳定域边界的同侧, 则可判定系统中长期电压稳定, 否则系统不稳定。基于稳定域和主导不稳定平衡点概念, 可得出中长期电压稳定性指标为

$$I_Q[\mathbf{x}(t_F)] = \frac{h_Q[\mathbf{x}(t_F)]}{h_Q(\mathbf{x}_{sep})} \quad (7)$$

式中:  $h_Q(\cdot)$  为式(6)所决定的描述中长期电压稳定域边界二次近似表达式;  $t_F$  为故障切除时刻;  $\mathbf{x}_{sep}$  为故障后稳定平衡点。

依托式(7), 本文给出中长期电压稳定判据: 若  $I_Q(\mathbf{x}(t_F)) > 0$ , 即故障切除后初始状态  $\mathbf{x}(t_F)$  在故障后中长期电压稳定域的内部, 则系统中长期电压稳定, 且  $I_Q(\mathbf{x}(t_F))$  值越大, 系统稳定裕度越大; 否则, 系统不稳定。下面给出中长期电压稳定判别步骤:

1) 根据 QSS 理论, 首先将系统短期动态方程用平衡方程替代, 只保留中长期动态方程, 建立系统的微分代数方程。

2) 给定故障地点和类型, 求解对应该故障的主导不稳定平衡点(controlling unstable equilibrium point, CUEP)<sup>[27]</sup>以及故障后的稳定平衡点  $\mathbf{x}_{sep}$ 。

3) 求解 CUEP 处雅可比矩阵  $\mathbf{J}$  的不稳定特征值  $\mu$  所对应的左特征向量  $\boldsymbol{\eta}$  以及二次项系数矩阵  $\mathbf{Q}$ 。

4) 根据 QSS 方法快速求解故障切除时刻的状态  $\mathbf{x}(t_F)$ 。

5) 将上述已知量代入式(7), 若  $I_Q(\mathbf{x}(t_F))$  大于零, 则系统中长期电压稳定; 否则, 系统将失去稳定。

## 4 仿真算例

### 4.1 系统模型

新英格兰 10 机 39 节点系统如图 3 所示。网络与发电机参数见文献[28]。除了平衡机之外, 其他发电机均装有典型可控硅励磁系统。在仿真过程中, 除了平衡机之外所有发电机均采用 QSS 模型, 所有负荷均采用广义自恢复负荷模型, 共 18 个, 负荷参数采用典型的由恒阻抗恢复到恒功率, 即  $\alpha_s = \beta_s = 0$ ,  $\alpha_r = \beta_r = 2$ ,  $T_p = T_q = 60$  s。系统中有 3 个 OLTC, 分别联接母线 10-11, 12-13 和 20-19, 其变比可以在下限 0.9 pu 与上限 1.1 pu 之间连续变化。本算例中发电机、励磁系统、负荷模型及 OLTC 模型(连续模型)均见第 2 节。

故障设置为: 连接节点 32 的发电机在 20 s 时因故障跳闸, 故障持续直到采取恢复措施, 假设故

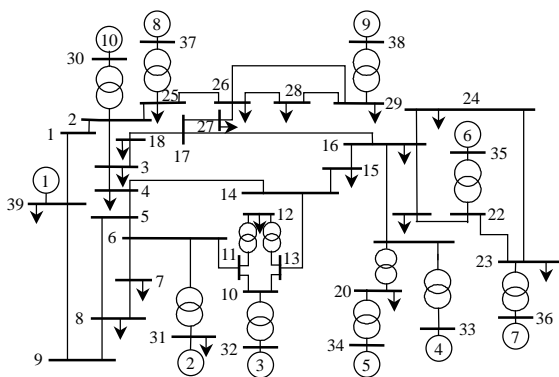


图 3 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 3 Ten machine thirty-nine bus system of New England

障前后系统相同, 即一段时间后发电机重合闸。

以下简单分析图 3 所示系统的计算复杂度。本例中, 发电机 10 台, 用平衡机作为参考机, 采用相对功角变量, 而其他发电机均采用 4 阶模型, 则共有  $9 \times 4 = 36$  个状态变量, 加上 3 阶励磁系统  $9 \times 3 = 27$  个状态变量, 3 个 OLTC 共  $3 \times 1 = 3$  个状态变量, 18 个广义自恢复负荷共  $18 \times 2 = 36$  个状态变量, 一共有 102 个状态变量, 这样在求解中长期电压稳定指标中的雅可比及海森矩阵时, 计算复杂度较高。而当采用了本文模型后, 发电机及励磁系统的状态变量全部变为代数变量, 此时的状态变量只剩下 39 个, 也就是说雅可比矩阵的维数从  $102 \times 102$  降为  $39 \times 39$ , 而海森矩阵的维数从  $102 \times 102 \times 102$  降为  $39 \times 39 \times 39$ , 再采用本文的半张量积方法, 海森矩阵的维数由三维的  $39 \times 39 \times 39$ , 进一步降为两维的  $39 \times 39^2$ , 计算复杂度锐减。

### 4.2 判断稳定性并求解切负荷启动时间

针对图 3 所示系统, 随着故障的持续, 故障后系统对应的中长期电压稳定指标在逐渐减小, 其变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 当故障持续到 410 s 时,  $I_Q = 0$ , 表明该系统在如上故障下最晚采取措施的时间为  $410 - 20 = 390$  s。此后  $I_Q < 0$ , 再采取重合闸发电机措施也无济于事, 即系统将失去中长期电压稳定。

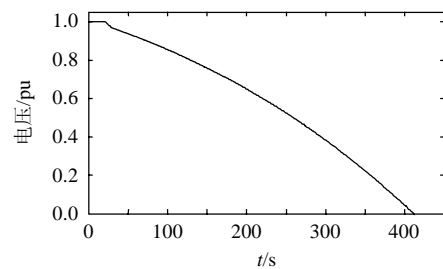


图 4 中长期电压稳定指标

Fig. 4 Index of medium-and long-term voltage stability

为验证中长期电压稳定指标的正确性, 图 5 和 6 给出了 QSS 时域仿真曲线, 仿真步长为 1 s。为清晰起见, 图 6 中仅给出了母线 11、12 和 13 的电压响应曲线, 这是因为这 3 条母线离故障点最近, 其电压最低。据此 2 图可以分析得出: 图 3 所示系统在节点 32 发电机跳闸的故障下, 最晚重合闸时间为  $437 - 20 = 417$  s。

综上, 根据本文判据得到的故障临界恢复时间的误差为  $(390 - 417) / 417 = -6.5\%$ , 虽然略偏保守, 但仍可满足工程需要。此外, 这里简单对比一下文章中求解 CUEP 与故障后时域仿真的时间。以故障后

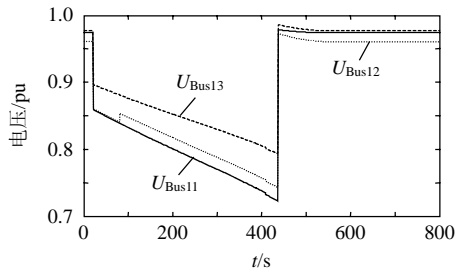


图5 故障恢复时刻为437s时的负荷电压仿真曲线

Fig. 5 Load voltage curve of fault recovery time 437s

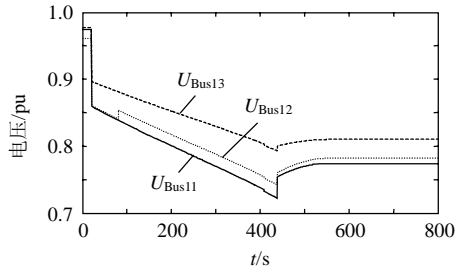


图6 故障恢复时刻为438s时的负荷电压仿真曲线

Fig. 6 Load voltage curve of fault recovery time 438s

仿真时间600s为例,计算CUEP的时间为0.9s,而用Matlab仿真故障后600s需要10.1s,可见文中所提方法所用时间缩短了90%以上。

## 5 结论

1) 该判据可以给出稳定裕度,能够为调度运行人员提供帮助。

2) 结合QSS仿真与稳定域边界理论,求解雅可比矩阵和海森矩阵时降低了难度,在计算速度上有着很大的优势,避免了电压失稳后长时间的时域仿真,可有效判断大扰动后系统的中长期电压稳定性。

3) 利用该判据可以迅速判断系统的中长期电压稳定性、求解切负荷启动时间,结果准确、可信,故具有较好的工程实用性。

4) 需要说明的是,由于基于半张量积方法的中长期电压稳定域边界近似方法对系统模型有较强的适应性,故其在算法上与文献[24]的暂态稳定性分析保持一致,这也正是该方法最大的优点之一。此外,本文所建立的中长期电压稳定分析模型并未涉及无故障情形下的中长期电压失稳问题,如因系统无功供给不足引发的1987年夏日本东京大停电。这既是本文工作的局限,亦是今后进一步研究的重点,一个可行的思路是将无功负荷的爬坡率作为关键可调参数引入本文模型从而拓宽其适用范围。

## 参考文献

[1] 汤涌,仲悟之,孙华东,等.电力系统电压稳定机理研究[J].电

网技术,2010,34(4):24-29.

Tang Yong, Zhong Wuzhi, Sun Huadong, et al. Study on mechanism of power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 24-29(in Chinese).

[2] 徐琳,卢继平,汪洋,等.电力系统节点电压稳定指标的研究[J].电网技术,2010,34(3):26-30.

Xu Lin, Lu Jiping, Wang Yang, et al. Research on nodal voltage stability index of power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 26-30(in Chinese).

[3] 庄慧敏,肖建.直接计算动态电压稳定Hopf分岔点的方法[J].电网技术,2009,33(17):91-95.

Zhuang Huimin, Xiao Jian. A method to directly calculate Hopf bifurcation point of dynamic voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 91-95(in Chinese).

[4] 陈文广,刘明波,林声宏.长期电压稳定准稳态仿真算法比较[J].电网技术,2009,33(9):44-51.

Chen Wenguang, Liu Mingbo, Lin Shenghong. Comparison of quasi-steady-state simulation algorithms for long-term voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 44-51(in Chinese).

[5] 杨金刚,房大中,李传栋.中期电压稳定的并行仿真算法[J].电网技术,2009,33(3):8-14.

Yang Jingang, Fang Dazhong, Li Chuandong. Parallel simulation for mid-term voltage stability analysis[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 8-14(in Chinese).

[6] 高鹏,石立宝,姚良忠,等.辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J].电网技术,2009,33(19):26-31.

Gao Peng, Shi Libao, Yao Liangzhong, et al. A multi-criterion integrated voltage stability index for weak buses identification [J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 26-31(in Chinese).

[7] Cutsem V. A comprehensive analysis of mid-term voltage stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995(10): 616-622.

[8] Van C T, Vournas C D. Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996(11): 146-154.

[9] Van C T, Mailhot R. Validation of a fast voltage stability analysis method on the Hydro-Quebec system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997(11): 282-292.

[10] Van C T, Kabouris J, Christoforidis G, et al. Application of real-time voltage security assessment to the Hellenic interconnected system [J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2005(152): 123-131.

[11] 汤涌.电力系统全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术与软件研究[D].北京:中国电力科学研究院.

[12] Astic J Y, Bihain A, Jerosolimski M, et al. The mixed Adams-BDF variable step size algorithm to simulate transient and long-term phenomena in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 2(9): 929-935.

[13] Frankhauser H R, Aneros K, Edris A A, et al. Advanced simulation techniques for the analysis of power system dynamics[J]. IEEE Computer Application in Power, 1990(10): 31-36.

[14] Kurita A, Okubo H, Oki K, et al. Multiple time-scale power system dynamic simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 1(8): 216-223.

[15] Sanchez-Gasca J J, D'Aquila R, Paserba J J, et al. Extended-term dynamic simulation using variable time step integration[J]. IEEE Computer Application in Power, 1993(8): 23-28.

- [16] Cutsem T V, Jacquemart Y, Marquet J N, et al. A comprehensive analysis of mid-term voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995(10): 1173-1182.
- [17] Cutsem T V. Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(2): 208-227.
- [18] 安宁, 周双喜, 朱凌志. 中长期电压稳定准稳态时域轨迹追踪方法[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 40-45.  
An Ning, Zhou Shuangxi, Zhu Lingzhi. An approach to trace power system quasi steady state time domain trajectories of medium and long term voltage stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 40-45(in Chinese).
- [19] 胡伟. 电压混成自动控制(HDVC)系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [20] 马进. 基于能量的电力系统暂态稳定分析和控制[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [21] Cheng D Z, Ma J, Lu Q, et al. Quadratic form of stable sub-manifold for power systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2004(14): 773-788.
- [22] 薛安成, 沈沉, 梅生伟, 等. 基于稳定域边界理论的暂态稳定指标及其应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 1-6.  
Xue Ancheng, Shen Chen, Mei Shengwei, et al. Transient stability index of power systems based on theory of stability region and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 1-6(in Chinese).
- [23] 叶俭, 梅生伟, 薛安成. 基于稳定域边界二次近似的暂态电压稳定分析[J]. 现代电力, 2005, 22(4): 6-11.  
Ye Jian, Mei Shengwei, Xue Ancheng. Transient voltage stability analysis based on second-order approximation of stability boundary[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(4): 6-11(in Chinese).
- [24] 王义红, 梅生伟. 基于稳定裕度指标的暂态电压稳定分析[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(2): 39-44.  
Wang Yihong, Mei Shengwei. Analysis of transient voltage stability based on a novel transient stability index[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(2): 39-44(in Chinese).
- [25] 安宁. 电压稳定的时域仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [26] 王义红, 梅生伟, 陈家荣. 考虑动态电压安全约束的预防控制粒子群优化算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 1-6.  
Wang Yihong, Mei Shengwei, Chen Jiarong. Dynamic voltage security constrained preventive control using particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 1-6(in Chinese).
- [27] 薛安成. 电力系统动态安全域研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [28] 张芳. 电力系统动态电压稳定控制算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.



王义红

收稿日期: 2010-10-25。

作者简介:

王义红(1981), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析、规划、运行及控制, E-mail: wangyihong@epri.sgcc.com.cn;

梅生伟(1964), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(责任编辑 王晔)