

# 模态分析技术在系统薄弱环节分析中的应用

张忠会<sup>1</sup>, 胡一波<sup>1</sup>, 朱文涛<sup>2</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省电力公司赣西供电公司, 江西 新余 338000)

**摘要:** 在传统的Q-V模态分析法基础上, 考虑了节点有功微增量变化对模态分析结果的影响, 利用修正后的降阶雅可比矩阵特征值对某一运行方式下的系统电压静态稳定性进行判别。并对该系统状态进行薄弱环节分析, 且在潮流方程中增加PV节点的无功微增量, 使得运用模态分析法计算节点参与因子时可以得到发电机节点对电压崩溃的参与程度, 弥补了使用传统Q-V模态分析法只能计算PQ节点参与因子的不足。结合非序贯的蒙特卡洛模拟法对系统状态进行随机抽样, 计算出系统电压崩溃的概率风险。针对IEEE-RTS 79系统算例做了应用研究, 验证了将改进后的模态分析技术运用到系统电压崩溃风险薄弱环节分析中的有效性。

**关键词:** 模态分析法; 薄弱环节; 电压崩溃; 风险评价

## Modal analysis technology in the application of the weak parts of systems

ZHANG Zhong-hui<sup>1</sup>, HU Yi-bo<sup>1</sup>, ZHU Wen-tao<sup>2</sup>

(1. Information Engineering College of Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Jiangxi Ganxi Power Supply Company, Xinyu 338000, China)

**Abstract:** Based on the traditional Q-V modal analysis method and considering the influence that a node's active micro increment changes to the results of modal analysis, this paper uses the amended reduced order of Jacobian matrix to identify the system static voltage stability, adds PV nodes of reactive power of micro increment in the power flow equations to analyze the weak link in the system state of sampling, gets the involvement of voltage collapse of the generator nodes when modal analysis method is used to calculate node participation factor, which makes up for the deficiency that the traditional Q-V mode only calculates PQ node participation factor. The non-sequential Monte Carlo simulation method is combined to proceed random sampling of the state of the system and calculate the probability of the voltage collapse. IEEE-RTS 79 system is analyzed to prove the availability in the analysis of the weak link of the risk of voltage collapse using improved modal analysis technology.

**Key words:** modal analysis method; weak link; voltage collapse; risk assessment

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)15-0058-07

## 0 引言

过去几十年中, 在世界上不同的电力系统中报告的电压不稳定事故有许多起。而电压崩溃事故的屡屡发生, 也引起了电力工作者的关注, 推动了电压稳定问题的研究。电压崩溃风险就是分析电网发生电压崩溃的概率和后果, 是关于系统最大传输功率能力的一种风险。然而, 面对已知的风险, 如何采取有效的措施来降低它, 成为亟需解决的问题。系统薄弱环节分析可以找出系统元件在导致电压崩溃中的参与程度如何, 并确定其位置, 为调度运行人员进一步操作提供依据, 是我们研究的重点。

文献[1-2]明确地给出了电压崩溃的定义, 并对电压失稳的机制进行了系统的研究和分析。文献[3]提出了一种关于 $P$ 、 $Q$ 的抛物线关系曲线, 建立了有功功率和无功功率之间的联系。文献[4]对电力系统中用于电压稳定分析的分岔理论进行了全面的概括, 模态分析法就是从中提炼出来的一种判断电压稳定性的方法。文献[5-10]分别采用不同的指标对电压稳定性进行分析。文献[5]构造了一种累积指数指标 $CI$ 。 $CI$ 值越小, 节点的稳定性能越好, 可以此确定系统的薄弱环节。文献[6]建立了一种全优化二次模型, 将计算出的最小切负荷量作为电压崩溃的后果。运用模态分析法判断系统稳定性, 并使用蒙特

卡洛模拟法得出系统失效概率, 进而求取风险值。形成了一套较为完整的风险评价思路。文献[7]也采用蒙特卡洛法对线路设置随机故障。文献[8]建立了计及二次电压控制作用的连续潮流模型, 运用裕度指标  $\lambda$  来证明控制二次电压可以提高系统稳定性。文献[9]和文献[10]分别采用灵敏度指标和裕度指标对薄弱环节进行分析。文献[11]比较了参与因子和贡献因子在模态分析中的不同作用。

由于已建立了较多成熟的数学模型对电压崩溃后果进行计算, 故重点阐述模态分析技术对潮流可解性的判断, 运用非序贯的蒙特卡洛法模拟系统状态, 计算出电压崩溃的概率风险, 并运用参与因子这一灵敏度指标找出系统的薄弱节点。

## 1 电力系统电压崩溃的机理分析

对电压崩溃问题认识的深化反映在对电压失稳机理的认识上。电压崩溃是指当系统处于电压不稳定状态, 负荷仍持续地试图通过加大电流以获得更大的功率(有功或无功), 则会发生电压崩溃<sup>[1]</sup>。 $P-U$  分析是一种典型的静态电压稳定分析方法, 其绘制出来的  $P-U$  曲线通过建立节点电压和某个区域负荷之间的关系, 非常直观地指示出区域负荷水平或传输功率水平导致整个系统临近电压崩溃的程度。

图1为当  $\tan\theta=1$  时标幺化的简单戴维南系统的  $P-U$  曲线。

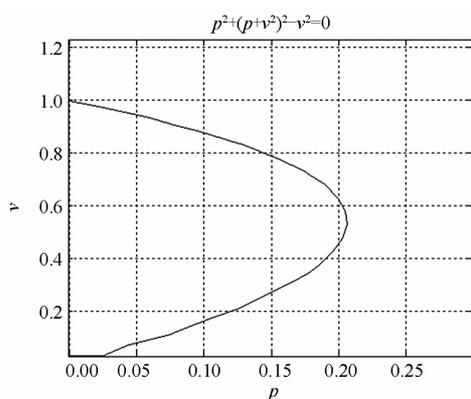


图1  $P-U$  曲线

Fig. 1 The  $P-U$  curve

可以看到, 随着负荷的增加, 系统内的电压变得越来越低, 直至达到崩溃点。该方法不但适用于简单的戴维南系统, 也可用于非常复杂的耦合网络之中。其中,  $P$  可以理解为一个区域内的总负荷,  $U$  是区域内所有的节点或是具有代表性的节点。所有节点均可做出各自的  $P-U$  曲线。而  $P-U$  曲线只是

电压失稳静态机理的一种解释, 根本问题还是电力系统自身固有的脆弱性, 与发电机、线路、负荷都有着密切联系。

对某一系统状态进行薄弱环节分析主要是针对节点进行的, 即发电机节点(PV节点)和负荷节点(PQ节点)。对于发电机节点, 当无功功率输出达到极限时, 发电机就失去了对电压的控制, 机端电压也就不再恒定, 会加剧崩溃条件; 对于负荷节点, 当受端无功不足, 功率因数无法有效提高, 系统最大传输容量受限, 同样将加剧崩溃条件。这为采取相应措施提高电压稳定性提供了理论依据。

## 2 模态分析法

### 2.1 节点有功微增量变化对模态分析结果的影响

$V-Q$  模态分析法是从电压和无功的关系来分析电压稳定性的, 它是一种直接计算系统临界点的方法, 其最大的特点就是计算速度快, 便于实现。下面对  $V-Q$  模态分析法的一般思路做一个简单的回顾。

极坐标下的牛顿—拉夫逊法潮流方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为节点有功微增量变化;  $\Delta Q$  为节点无功微增量变化;  $\Delta\theta$  为节点电压角度微增量变化;  $\Delta V$  为节点电压幅值微增量变化;  $J$ 、 $J_{P\theta}$ 、 $J_{PV}$ 、 $J_{Q\theta}$ 、 $J_{QV}$  为雅可比矩阵及其所有的子阵。

通常地, 在电力系统稳定运行时, 无功功率变化对电压幅值的影响远大于有功功率变化对其影响。故假定  $\Delta P=0$ , 于是有

$$0 = J_{P\theta}\Delta\theta + J_{PV}\Delta V \quad (2)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta}\Delta\theta + J_{QV}\Delta V \quad (3)$$

最后可以得到节点无功微增量关于节点电压幅值微增量的变化为

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta}J_{P\theta}^{-1}J_{PV}]\Delta V = J_R\Delta V \quad (4)$$

或

$$\Delta V = J_R^{-1}\Delta Q \quad (5)$$

式中,  $J_R$  为系统简化的雅可比矩阵, 也称降阶雅可比矩阵。

由式可知, 当降阶雅可比矩阵接近奇异, 即  $|J_R|$  趋近于零时, 系统无功功率微小的变化都会导致电压幅值剧烈地变化, 即发生电压崩溃。文献[12]明确证明了在  $P-U$  曲线的上半支及下半支的一部分包含鞍结点,  $J_{P\theta}$  矩阵是不可约的弱对角占优阵, 是非奇异的, 即矩阵  $J_{P\theta}$  可逆。因此, 降阶雅可比矩阵

本身的奇异性就成为了电压崩溃风险评价中判断潮流可解性的重要判据。

在分析上述过程时可以发现, 假定  $\Delta P=0$ , 是建立在完全忽略有功微增量变化对电压幅值影响的基础上的。这样在获取崩溃点模态信息时不够准确, 将对之后节点参与因子的计算产生影响, 最终导致对系统薄弱环节的分析出现偏差。现考虑节点有功微增量变化, 给出了  $\Delta V$  关于  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  的表达式, 并最终回归到建立  $\Delta V$  和  $\Delta Q$  的关系式, 对降阶雅可比矩阵进行修正。修正如下:

$$\Delta V = -J_R^{-1} J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} \Delta P + J_R^{-1} \Delta Q \quad (6)$$

将  $\Delta P$  写成关于  $\Delta V$  的函数, 就可以重新得到  $\Delta V$  和  $\Delta Q$  的关系式。假设一个  $n$  节点系统, 第 1~ $m$  号节点为 PQ 节点, 第  $m+1$ ~ $n-1$  号节点为 PV 节点, 第  $n$  号节点为平衡节点。则  $\Delta P$  为  $(n-1) \times 1$  阶矩阵,  $\Delta V$  为  $m \times 1$  阶矩阵, 它们之间的函数关系必然是一个  $(n-1) \times m$  阶矩阵。考虑到含  $\Delta P$  部分对  $\Delta V$  影响不大, 直接采用  $J_{PV}$  表征二者的函数关系是合理的。此时, 式(6)变为

$$\Delta V = -J_R^{-1} J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \Delta V + J_R^{-1} \Delta Q \quad (7)$$

即

$$\Delta V = (J_R + J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV})^{-1} \cdot \Delta Q \quad (8)$$

式中,  $(J_R + J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV})$  即为修正后的降阶雅可比矩阵, 记为  $JX_R$ 。

## 2.2 考虑 PV 节点的系统薄弱环节分析

模态分析技术不仅可以得到电压崩溃风险评价中潮流可解性的判据, 还能够分析出某一系统状态下各个节点的无功对电压幅值变化的贡献程度。这是因为在降阶雅可比矩阵的特征向量中蕴含了网络节点在每一个模式中的参与程度和电压失稳的信息<sup>[13]</sup>。

定义了一种电压不稳定模式用以分析系统薄弱环节。令

$$JX_R = U\lambda V^T \quad (9)$$

则

$$JX_R^{-1} = U\lambda^{-1}V^T \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为  $J_R$  的特征值矩阵;  $U$ 、 $V$  为  $JX_R$  的左右特征向量。由式(7)、式(8)可以得到

$$\Delta U = \sum_i \frac{U_i V_i^T}{\lambda_i} \Delta Q \quad (11)$$

式中:  $U_i$  是  $J_R$  的第  $i$  列右特征向量;  $V_i$  是  $JX_R$  的第  $i$  行左特征向量;  $\lambda_i$  是  $\lambda$  中第  $i$  个特征值。

式(11)表明, 特征值越小, 系统临近电压不稳定的程度越高。每一个左右特征向量和特征值决定了无功—电压响应的第  $i$  个模式。由此得到在节点

$K$  的电压—无功灵敏度为

$$\frac{\partial U_K}{\partial Q_K} = \sum_i \frac{U_{Ki} V_{iK}}{\lambda_i} = \sum_i \frac{P_{Ki}}{\lambda_i} \quad (12)$$

式中:  $U_{Ki}$ 、 $V_{iK}$  分别为  $U_i$ 、 $V_i$  的第  $K$  个元素;  $P_{Ki}$  为节点  $K$  的参与因子。

节点  $K$  的参与因子越大, 相应模态下对电压—无功灵敏度的贡献越大, 且在该节点下施加补救措施的有效性也越大。

现在潮流方程式(1)中增加 PV 节点的无功部分  $\Delta Q_G$ , 使得 PV 节点的电压—无功灵敏度也能以参与因子的形式表现出来, 对系统的薄弱环节做出全面的分析。由于在原修正方程式中 PV 节点只考虑相角的变化, 故在新的修正方程式中, 仍将 PV 节点的电压幅值变化以及各节点有功无功变化对其的偏导数设为 0, 则有

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q_L \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV_L} & 0 \\ J_{Q_L\theta} & J_{Q_L V_L} & 0 \\ J_{Q_G\theta} & J_{Q_G V_L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

新的修正方程式同样可以表示为修正后的降阶雅可比矩阵

$$\Delta V = JX_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (14)$$

只是  $J_{P\theta}$ 、 $J_{PV}$ 、 $J_{Q\theta}$ 、 $J_{QV}$  的内容发生了相应的变化。此时, 修正后的降阶雅可比矩阵  $JX_R$  中同时包含了 PQ、PV 节点对电压崩溃的参与信息, 是一个  $(n-1) \times (n-1)$  阶矩阵。其上半部分  $m \times m$  阶子阵  $J$  为未考虑 PV 节点无功部分时的原  $JX_R$  矩阵, 下半部分  $(n-m-1) \times m$  阶子阵  $J_G$  为考虑 PV 节点无功部分后 PV 节点的参与信息矩阵, 其余部分均为 0。则  $J_G$  每一模式下的向量为

$$G_i = J_G \times U_i \quad (15)$$

将  $G_i$  单位化后得到在第  $i$  种模式下各 PV 节点的参与因子。这样, 我们就得到系统中除平衡节点外所有节点的参与因子, 以便更加全面地分析系统电压崩溃风险的薄弱环节。

## 3 风险评价中的薄弱环节分析

### 3.1 电压崩溃风险指标

风险在应用中常被定义为: 能导致伤害的灾难可能性和这种伤害的严重程度<sup>[14]</sup>。从定义可以看出, 导致损失的可能性与相应后果的严重程度是风险的两个重要因素, 风险指标就是用两者的乘积来表示的。风险指标定量地描述了系统的安全状况。为简化起见, 只采用非序贯的蒙特卡洛法计算系统电压崩溃的概率指标  $P$ 。在失效后果方面, 用系统

失效记为 1, 不失效记为 0 来表示。

### 3.2 系统状态选取及分析

使用蒙特卡洛法进行系统状态选取。参与抽样的系统元件包括发电机组、架空线路、变压器、并联电抗器。将每一个元件用一个在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数 $R_i$ 来模拟<sup>[15]</sup>。假设每一元件有失效和工作两种状态, 且元件间失效是相互独立的。令 $S_i$ 代表元件 $i$ 的状态,  $Q_i$ 代表其失效概率, 则可以用抽得的随机数和对应元件的失效概率进行比较, 从而得到 $N$ 个元件的系统状态矢量 $S$ 。

对元件 $i$ 状态的判断如下式:

$$s_i = \begin{cases} 0 & \text{如果 } R_i > Q_i \text{ (工作)} \\ 1 & \text{如果 } 0 \leq R_i \leq Q_i \text{ (失效)} \end{cases} \quad (16)$$

则具有 $N$ 个元件的系统状态矢量 $S$ 表示为

$$S = (s_1, \dots, s_i, \dots, s_N) \quad (17)$$

文献[16-19]对元件失效概率的计算进行了详细的描述。采用计及环境和老化失效的元件停运概率算法, 综合考虑可修复失效、老化失效和环境相依失效, 采用相互独立事件的概率方法对元件失效概率进行计算。

一个系统状态在抽样中被选定后, 再利用模态分析技术对系统状态进行分析, 以判断其是否会导致电压崩溃。如果是, 则将该状态记为失效状态, 并对该样本的薄弱环节进行详细分析, 给出各节点的参与因子。如果不是, 则进行下一次抽样。当抽样的数量足够大时, 系统状态 $S$ 的抽样频率可作为其概率的无偏估计, 即

$$P(S) = \frac{m(S)}{M} \quad (18)$$

式中:  $M$  是抽样数;  $m(S)$  是在抽样中系统失效状态出现的次数。

可以看到, 在风险评价过程中加入系统薄弱环节分析, 不仅可以得出一个区域电网的整体风险值处在什么水平, 还可以将风险细化到每一个节点上, 使得评价更加全面立体。

### 3.3 电压崩溃风险评价流程

对电压崩溃风险评价的流程如图 2。它展示了模态分析技术下的系统薄弱环节分析在整个评价流程中所处的环节和位置。

## 4 算例分析

### 4.1 算例简介

采用 IEEE-RTS 79 节点系统对电压崩溃风险进

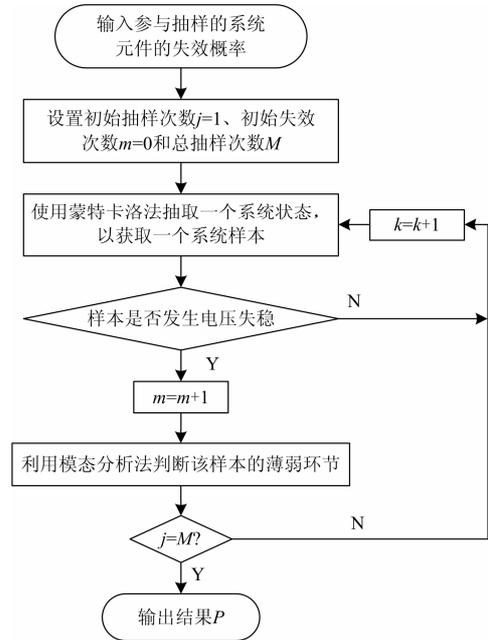


图 2 电压崩溃风险评价流程图

Fig. 2 Flow chart of voltage collapse risk assessment

行评估, 计算出各个节点的参与因子并指出其薄弱环节, 如图 3 所示。该系统分为南、北 (138 kV/230 kV) 两个区域, 共有 24 条母线, 38 条支路, 33 台发电机组, 装机容量为 3 405 MW, 系统负荷为 2 850 MW。

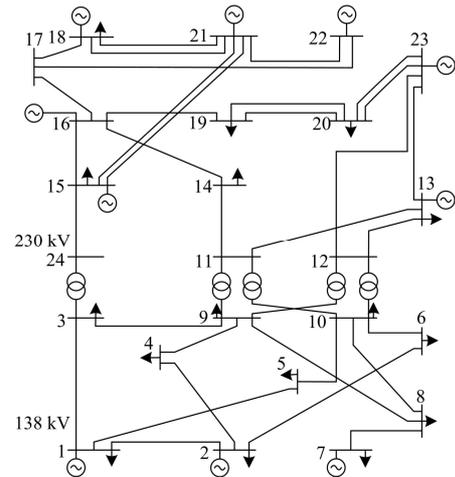


图 3 IEEE-RTS 79 系统单线图

Fig. 3 IEEE-RTS 79 system single line figure

### 4.2 电压崩溃风险分析

根据第 3.2 节所描述的电压崩溃风险计算步骤及 IEEE-RTS 79 节点系统数据, 对系统采用非序贯蒙特卡洛模拟法的抽样, 通过模态分析计算出系统的电压崩溃风险值如表 1 所示。

表 1 状态模拟结果

Table 1 Results of status simulating

取样次数	100 000	120 000	140 000	160 000	200 000
崩溃次数	6	6	7	9	11
风险 ( $\times 10^{-5}$ )	6	5	5	5.6	5.5
状态数	14 239	16 219	17 903	19 278	22 192
崩溃状态数	4	4	5	5	6

由分析结果可以看出,在现有运行的电网中,电压崩溃本身发生的概率是极小的,但其造成的后果往往是整网或整片区的失负荷,造成巨大的经济损失。随着抽样次数的增加,系统崩溃次数也随之增加。总体来说,系统电压崩溃的概率稳定在 $10^{-5}$ 级别。此外,从所有的崩溃状态数中选取了发生概率较大的几种情况进行排序,从而得出在现有网架下我们需要关注的对象。

由表 2 结果可知:

1) 该系统南北区由 5 台联络变压器相连。特别地, $L_{3-24}$ 支路变压器无备用。当 $G_{15-6}$ 失效,出力减少,且 $L_{3-24}$ 、 $L_{15-24}$ 同时失效,24号母线失压,使得正常情况下本就承担最大有功潮流的 $L_{14-16}$ 支路要传输更大的功率,将超过其极限。

2) 支路 $L_{13-23}$ 、 $L_{12-23}$ 、发电机组 $G_{23-1}$ 失效后,转供负荷需要 13 号平衡节点来平衡,而 13 号节点装机容量有限。加上承载着最大有功潮流的 $L_{14-16}$ 支路失效,使得降阶雅可比矩阵 $JX_R$ 的特征值出现负值,系统运行在不稳定的潮流解上。

3) 由于南区是负荷区域,负荷总量较之北区更大。当节点 2、7 上的发电机组全部失效,南区的负荷几乎全部通过 5 台联变由北区提供,超过其最大传输极限。

表 2 严重故障模式

Table 2 Serious failure mode

序号	故障设备	概率 ( $\times 10^{-6}$ )
1	$L_{3-24}$ $L_{15-24}$ $G_{15-6}$	1.33
2	$L_{13-23}$ $L_{12-23}$ $L_{14-16}$ $G_{23-1}$	0.52
3	$G_2$ $G_7$	0.33

注: $L_{i-j}$ 为连接节点*i*与节点*j*的支路; $G_{h-k}$ 为节点*h*上的第*k*台发电机组。

### 4.3 薄弱环节分析

以节点 7 上所有发电机组、节点 2 上一台发电机组失效为例,得到一个运行在失稳临界点附近的系统状态。需要指出,此时节点 7 已转换为 PQ 节点。在该系统状态下,将修正前后的降阶雅可比矩

阵特征值进行对比,如表 3 所示。

表 3 修正前后降阶雅可比矩阵特征值对比

Table 3 Reduced order Jacobian matrix eigenvalue comparison before and after correction

修正后降阶雅可比矩阵 特征值	原降阶雅可比矩阵 特征值
4.596 5	3.876 1
9.700 5	5.379 5
10.818 7	8.391 0
14.233 1	10.879 2
18.691 8	15.209 7
19.727 3	16.206 7
31.462 1	25.196 5
37.688 3	36.130 5
49.255 3	46.736 9
56.728 3	50.278 9
61.460 0	58.110 2
75.180 1	74.190 2
118.346 5	109.928 3
174.301 1	152.673 0

可以看到,修正后的模态特征值较之前有小幅增加,将对系统失稳临界点的判定以及之后节点参与因子的计算产生影响。

此外,对其薄弱模态和参与因子(包括发电机参与因子)进行计算。选取 2 个最小特征值对应模态下的 5 个最大的 PQ 节点参与因子与 PV 节点参与因子,如表 4、表 5 所示。

因此可以得到:在该系统状态下,5号、7号、10号节点的 PQ 节点参与因子很大,且都处于南部重负荷地区。在上述薄弱负荷节点加装并联电容器用以避免电压崩溃事件发生是最为有效,也是最为经济的。15号、16号、21号节点的 PV 节点参与因子很大,且都处于北部主要电能供应地区。对上述薄弱发电机节点要保证其无功出力,注意和其他发电机的无功配合。

表 4 PQ 节点参与因子

Table 4 PQ node participation factor

$\lambda = 4.596 5$		$\lambda = 9.700 5$	
节点编号	参与因子	节点编号	参与因子
5	0.520 2	7	0.479 2
7	0.383 0	10	0.145 7
10	0.055 8	8	0.133 0
9	0.027 1	5	0.124 9
12	0.011 3	9	0.097 8

表 5 PV 节点参与因子

$\lambda = 4.5965$		$\lambda = 9.7005$	
节点编号	参与因子	节点编号	参与因子
15	1	15	1
16	0.6465	16	0.5577
21	0.1365	21	0.2952
23	0.1164	14	0.1727
1	0.0219	1	0.0884

## 5 结论

1) 使用非序贯蒙特卡洛模拟法对 IEEE-RTS 79 节点系统的系统状态进行抽样, 使用改进后的模态分析技术对系统是否发生电压崩溃进行判断, 并计算出了该系统发生电压崩溃的概率风险。

2) 将修正前后的降阶雅可比矩阵对应的特征值进行比较, 验证了其对系统失稳临界点判定的影响程度。

3) 对指定系统状态下的节点参与因子进行计算, 包括发电机节点和负荷节点。给出了该状态下最薄弱的节点, 即薄弱环节。在对应位置采取补救措施将取得最好的效果。

## 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 Wu-zhi, SUN Hua-dong, et al. Study on mechanism of power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 24-29.
- [2] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美. 考虑极限诱导分岔的电压稳定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 24-29.  
MA Zhao-xing, WAN Qiu-lan, LI Hong-mei. Research on voltage stability analysis of limit induced bifurcation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 24-29.
- [3] PAOSATEANPUN R, CHUSANAPIPUTT S, PHOOM-VUTHISARN S, et al. The line P-Q curve for steady-state voltage stability analysis[C] // IEEE International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006: 1-5.
- [4] 赵兴勇, 张秀彬, 苏小林. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 87-95.  
ZHAO Xing-yong, ZHANG Xiu-bin, SU Xiao-lin. Voltage stability studies and bifurcation theory in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 87-95.
- [5] 张学清, 梁军, 董晓明. 基于累积指数的电网电压稳定性能的评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 235-241.  
ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, DONG Xiao-ming. An assessment for voltage stability performance of power grid based on cumulating index[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 235-241.
- [6] 余娟, 李文沅, 颜伟. 静态电压稳定风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 40-46.  
YU Juan, LI Wen-yuan, YAN Wei. Risk assessment of static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 40-46.
- [7] 马瑞, 袁文伟. 基于蒙特卡罗随机选线最优潮流的电压崩溃临界点算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 65-69.  
MA Rui, YUAN Wen-wei. An approach for determining voltage collapse critical point based on Monte Carlo stochastic line selection optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 65-69.
- [8] 郭鸿毅, 刘明波, 林舜江. 二次电压控制对静态电压稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 20-24.  
GUO Hong-yi, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Analysis of effects of secondary voltage control on static voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 20-24.
- [9] 张小兵, 吴政球, 李连伟, 等. 基于拟合方法的 N-1 静态电压稳定裕度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 23-27.  
ZHANG Xiao-bing, WU Zheng-qiu, LI Lian-wei, et al. N-1 steady-state voltage margin calculation based on fitting computation method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 23-27.
- [10] 邱威, 张建华, 刘念. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.  
QIU Wei, ZHANG Jian-hua, LIU Nian. Multi-objective optimal power flow considering environmental factor and

- voltage stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 190-197.
- [11] 彭谦, 马晨光, 杨雪梅, 等. 线性模态分析中的参与因子与贡献因子[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 92-96.  
PENG Qian, MA Chen-guang, YANG Xue-mei, et al. Participation factors and contribution factors in linear modal analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 92-96.
- [12] 曹国云, 王强, 刘丽霞. 电压稳定分析中降阶潮流雅可比矩阵的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 42-47.  
CAO Guo-yun, WANG Qiang, LIU Li-xia. Research on power flow reduced Jacobian matrix for voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 42-47.
- [13] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [14] International council on large electric systems (CIGRE) task force 38.03.12. Power system security assessment[J]. Electra, 1997(175): 49-77.
- [15] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [16] BILLINTON R, LI Wen-yuan. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. New York and London: Plenum Press, 1994.
- [17] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. Second Edition. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [18] LI Wen-yuan. Incorporating aging failures in power system reliability evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002: 918-923.
- [19] LI Wen-yuan, PAI S. Evaluating unavailability of equipment aging failures[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002: 52-54.

收稿日期: 2013-10-22; 修回日期: 2013-12-23

作者简介:

张忠会(1962-), 男, 教授, 从事电力系统自动检测与控制及电力系统规划等研究;

胡一波(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动检测与控制。E-mail: c203chaxin@163.com