

# 基于模糊逻辑的电力系统电压崩溃警报系统

张希, 黄志刚, 黄民聪, 戴宁怡

(澳门大学 科技学院, 中国 澳门特别行政区)

## Power System Voltage Collapse Alarm System Using Fuzzy Logic

ZHANG Xi, WONG Chikong, WONG Manchung, DAI Ningyi

(Faculty of Science and Technology, University of Macau, The Macao Special Administrative Region, China)

**ABSTRACT:** Considering both static power transfer limit and dynamic load characteristics a voltage collapse alarm system, which raises different alarm levels of voltage collapse, is proposed to warn that voltage collapse will occur possibly. The higher the alarm level, the more possibly the voltage collapse occurs. Both system fault and slow load growth can lead to voltage collapse, and the proposed alarm system is designed for the latter. The proposed alarm system is implemented by fuzzy logic and it excels at processing problems of uncertain and nonlinear problems. Two main factors leading to voltage collapse, namely the static power transfer limit that is represented by line stability factor (LQP) and the dynamic load characteristics that are reflected by  $dQ/dt$  and  $dP/dt$ , are considered. By means of fuzzy processing dynamic voltage stability indices are attained and divided into different alarm levels, i.e., the voltage stability level. The feasibility and effectiveness of the proposed alarm system are verified by IEEE 39-bus system, in which electric motors are taken as dynamic load.

**KEY WORDS:** voltage collapse; alarm system; voltage stability index; load dynamics; fuzzy logic

**摘要:** 文中建立了一个既考虑静态传输能力极限又考虑动态负荷特性的电压崩溃警报系统, 给出不同级别的警报, 指出电压崩溃将有可能发生。警报级别越高, 电压崩溃发生的可能性越大。系统故障和负荷缓慢增长都可引发电压崩溃, 文中针对后者。该系统通过模糊逻辑实现, 擅长处理不确定性和非线性问题。考虑了引起电压崩溃的2个主要因素: 传输能力极限和负荷动态特性, 前者由线路稳定因子 LQP 表示, 后者由  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  指示。经模糊系统得到动态电压稳定指数(DVSI), 并划分成不同的警报级别, 即电压稳定水平 VSL。其可行性和有效性由 IEEE 39 节点系统验证, 动态负荷为电动机。

**关键词:** 电压崩溃; 警报系统; 电压稳定指标; 负荷动态; 模糊逻辑

## 0 引言

近年来, 世界范围内发生了多起大面积停电事故<sup>[1-2]</sup>, 很多是由于首先发生或伴随发生电压失稳而导致系统崩溃, 例如 2003 年 8 月 14 日的美加大停电<sup>[3-4]</sup>、2006 年 11 月 4 日欧洲大停电等<sup>[5-6]</sup>, 电压稳定已成为当今电力系统的重要研究课题。尽管研究人员希望能准确预测电压崩溃, 但是由于电压失稳发生的根源在于动态负荷的功率恢复特性, 加上电力系统的复杂性、非线性和不确定性, 到目前为止, 准确预测电压崩溃仍然处于摸索阶段。因此本文着重于建立一个电压崩溃警报系统, 对电力系统的运行状况给出不同级别的警报, 指出电压崩溃将有可能发生, 使运行人员有所准备。警报级别越高, 电压崩溃发生的可能性越大。

文献[7]将电压稳定分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定。其中大扰动电压稳定关心的是大扰动(系统故障, 失去负荷, 失去发电机等)之后系统控制电压的能力; 而小扰动电压稳定关心的是小扰动(负荷的缓慢变化)之后系统控制电压的能力。虽然电压崩溃经常受到系统故障影响, 但是无故障时负荷缓慢增长也会导致电压崩溃, 例如日本东京 1987 年的电压崩溃事故<sup>[8]</sup>。文献[7]归纳的电压崩溃起因也包含系统负荷的持续增加。而本文的研究主要针对由负荷增长引起的电压崩溃。

电压崩溃可能由多种因素引发, 文献[7]概括了电压崩溃的特征, 例如电源远离负荷中心、无功储备不足、系统负荷加重等, 这些因素都可通过传输线的最大功率极限来反映。文献[9]指出, 电压失稳源自于负荷动态特性试图恢复的功率超出了传输系统和发电系统的承受能力。可见不仅功率传输极限会引起电压崩溃, 负荷的动态特性更能揭示电压

失稳过程的本质。在本文的研究中，着重分析了传输极限和动态负荷这 2 个主要因素。

虽然电压稳定与电压紧密相关，但节点的电压值并不能很好地指示系统的电压稳定性，功率传输极限点的电压值在不同功率因数下差别很大<sup>[10]</sup>。静态研究把功率传输极限看作是电压稳定极限<sup>[7,9]</sup>，通过电压稳定指标来指示电压稳定性<sup>[11-14]</sup>。近年来又提出多个电压稳定指标，包括视在功率对导纳的导数  $DSY$ <sup>[15]</sup>，电压无功指标  $VQI$ <sup>[16-17]</sup>，虚拟有功裕度  $IVAM$ <sup>[18]</sup>，都是基于系统的传输极限，因此可以反映系统的静态电压稳定性。

但是电压稳定本身是一个动态过程<sup>[9]</sup>，动态研究指出，电压崩溃与负荷的功率恢复特性紧密相关，而与系统是否到达传输极限并没有直接对应关系<sup>[19]</sup>。电压失稳可发生在系统达到传输极限之前或之后。对于发生在传输极限之后的电压失稳，静态电压稳定指标仍能给出有效的警报。但对于发生在传输极限之前的电压崩溃事件则难以判别。电压崩溃是否发生，归根结底还是取决于负荷是否失稳。研究指出，当节点电压降低时，动态负荷不能维持有功平衡，注入该节点的有功功率大幅减少，无功功率突然增加<sup>[20-21]</sup>。因此本文提出负荷动态特性指标  $dQ/dt$  和  $dP/dt$ ，与静态电压稳定指标结合运用。

同时，为解决传统评估方法存在的速度慢、精度低等问题，多种人工智能技术已经用于系统电压稳定的预测，例如人工神经网络、模糊逻辑、决策树、遗传算法等<sup>[22-23]</sup>。这些技术各有其优缺点，而模糊逻辑的优势在于解决不确定性和非线性问题。电力系统是一个非常复杂的动态非线性系统，电压稳定的发生包含多种不可预知的因素，即不确定性，很难用精确的数学模型来描述。因而可采用模糊逻辑对系统的电压稳定性进行有效的判断。

在此之前有一些研究利用模糊逻辑对电压稳定进行评估。文献[24]通过模糊推理机得到一个百分比来指示电压稳定的水平，其输入量都是通过简单的潮流计算得到的(电压幅值，无功储备，无功损耗)。文献[25]提出了把电压幅值和发电机的无功储备映射到一个模糊的稳定程度指数。文献[26]把最低的节点电压和系统的无功储备作为输入量来指示电压稳定状况。这些研究都没有考虑导致电压崩溃的最关键因素—负荷动态特性。此外，电压幅值并不能准确地指示电压失稳的发生。

本文利用模糊逻辑的方法建立一个考虑动态

负荷的电压崩溃报警系统。选取线路稳定因子(line stability factor, LQP)<sup>[14]</sup>以及负荷动态特性指标( $dQ/dt$  和  $dP/dt$ )作为模糊系统的输入量，既指示了功率传输极限，又反映了负荷动态失稳的影响。动态电压崩溃主要是动态负荷通过其负荷功率恢复特性维持有功平衡失败而引发的，虽然动态负荷失稳并不一定代表整个系统电压崩溃的发生，但是它会引引起负荷节点电压大幅度下降，增加了系统崩溃的可能性。因此，文中假设异步电动机停转时系统发生电压崩溃。

## 1 有效的电压稳定指标

### 1.1 静态电压稳定指标

在之前的研究中，提出了很多静态电压稳定指标(voltage stability index, VSI)用来衡量电力系统的功率传输极限，例如  $FVSI$ <sup>[11]</sup>， $L_{mn}$ <sup>[12]</sup>， $LVSI$ <sup>[13]</sup>， $LQP$ <sup>[14]</sup>等，它们都是在静态负荷的情况下提出的。本文在文献[27]中对这些稳定指标的性能在动态负荷存在的情况下进行了比较，其中  $LQP$  的准确度是最高的。 $LQP$  是 A.Mohamed 等基于 2 节点系统的潮流方程的有解条件提出的<sup>[14]</sup>。

图 1 为 2 节点系统的电路模型。图中： $V_1 \angle \delta_1$ 、 $V_2 \angle \delta_2$  为发端和受端的节点电压向量； $P_1$ 、 $Q_1$  为节点 1 发出的有功和无功； $P_2$ 、 $Q_2$  为节点 2 注入的有功和无功； $Z = R + jX$  为线路阻抗。

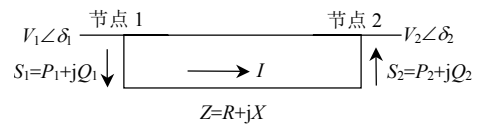


图 1 2 节点系统模型

Fig. 1 Two-bus power system model

线路稳定因子  $LQP$  可定义为

$$L_{ij} = 4 \left( \frac{X}{V_i^2} \right) \left( Q_j - \frac{P_i^2 X}{V_i^2} \right) \quad (1)$$

$LQP$  接近 1.0 时，线路到达传输能力极限。对于静态负荷来说，当负荷需求增加时，受端注入的有功和无功将同步增加。但是这一情况并不适用于动态负荷，动态负荷具有功率恢复特性，为了维持恒定的有功，无功的需求大量增加。 $LQP$  同时用到了有功  $P_i$  和无功  $Q_j$ ，无论无功还是有功的变化都可以反映到  $LQP$  的变化中，因此  $LQP$  适用于动态负荷的情况。但是，电压失稳可发生在系统达到传输极限之前。系统处于电压崩溃点时， $LQP$  的值可能还没有到达 1.0，仅利用  $LQP$  不能解决这类问题。

### 1.2 负荷动态特性指标

根据文献[9]的定义,电压崩溃可能由动态负荷维持不了有功平衡而引发,出现在系统传输极限之前。考虑负荷的动态特性更能揭示电压失稳过程的本质。因此本文提出  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  2 个指标反映负荷的动态特性,可以对出现在传输极限之前的电压崩溃给出警报。

异步电动机是电力负荷的一个重要组成部分,文献[21]总结了异步电动机对于电压崩溃的产生的影响。当异步电动机的运行状态因电压扰动而发生变化时,其等效的动态功率-电压特性曲线如图2所示。图中箭头指示了电压下降的方向。

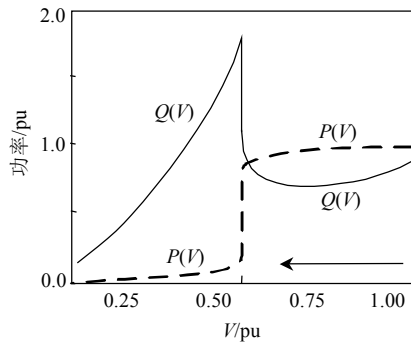


图2 异步电动机功率-电压特性曲线  
Fig. 2 Power-voltage characteristics curve of induction motor

随着节点电压的降低,当某些节点上的电动机不能维持有功平衡时,注入该节点有功会大幅减少,无功会突然增加。无功的导数  $dQ/dt$  和有功的导数  $dP/dt$  可能会比正常状态大。同时,电动机将减速直到完全停转,引发电压崩溃。这2个特性更好地解释了电压崩溃发生的机制。

## 2 电压崩溃警报系统

### 2.1 基本结构

电压稳定问题具有复杂性,非线性和不确定性,很难通过建立数学模型来描述。模糊逻辑具有定量与定性相结合的特点,通过模糊规则和隶属函数把模糊语言转化成数值的描述,适用于处理不确定性和非线性问题。本文运用模糊逻辑建立了一个考虑动态负荷的电压稳定警报系统,如图3所示。通过同步向量测量技术,计算得到3个输入量,运用模糊逻辑得到电压稳定水平(voltage stability level, VSL)来反映系统的电压稳定状况。输入变量为所有线路 LQP 的最大值,所有节点  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  的最大值。

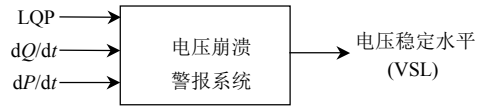


图3 电压崩溃警报系统的基本结构

Fig. 3 Basic structure of voltage collapse alarm system

### 2.2 模糊推理系统

模糊逻辑<sup>[28-29]</sup>中涉及到的最主要的概念就是模糊集合,在模糊集合涉及的数值范围一论域  $X$  上,给定了一个映射:

$$A: X \rightarrow [0, 1], x \rightarrow \mu_A(x)$$

则称集合  $A$  为论域  $X$  上的模糊集合,用  $\mu_A(x)$  表示  $X$  中各个元素  $x$  属于集合  $A$  的程度,称为元素  $x$  属于模糊集合  $A$  的隶属函数,模糊集合完全由隶属函数所描述。

模糊规则是模糊推理系统的核心,模糊规则可以被定义为一个条件语句的形式:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B$$

其中:  $X$  和  $Y$  是语言变量;  $A$  和  $B$  为由论域  $X$  和  $Y$  上的模糊集合定义的语言值。

模糊推理系统由模糊化、模糊规则库、模糊推理器和解模糊 4 部分组成。首先由模糊化精确输入量转化为模糊输入量;然后模糊推理器根据模糊规则的语义解释、处理模糊输入量,并把模糊输出量传送到解模糊部分;最后通过解模糊将模糊输出量转化为精确输出量。其基本组成结构如图4所示。

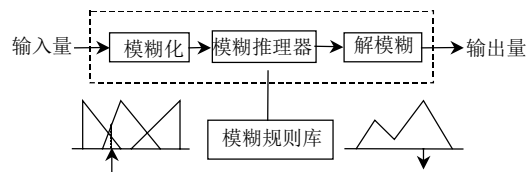


图4 模糊推理系统的4个模块

Fig. 4 Four modules of a fuzzy inference system

### 2.3 基于模糊逻辑的电压崩溃警报系统

基于模糊逻辑的电压崩溃警报系统由2部分组成:模糊推理系统和不同程度报警信号的确定,如图5所示。3个电压稳定指标 LQP,  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  作为输入量进入模糊系统。得到动态电压稳定指数 (dynamic voltage stability index, DVSI), 根据 DVSI

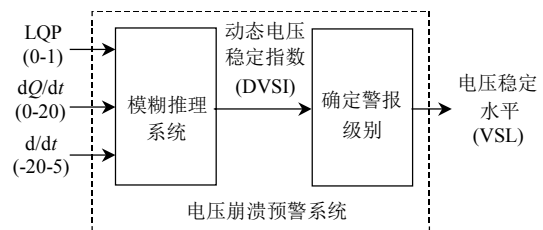


图5 电压崩溃警报系统

Fig. 5 Voltage collapse alarm system

的大小定义 VSL，给出不同程度的报警信号。

首先，模糊推理系统的输入量为上述 3 个有效的电压稳定指标。

- 1) LQP: 线路稳定指标, 论域为[0,1];
- 2)  $dQ/dt$ : 节点注入无功的导数, 论域为[0,20];
- 3)  $dP/dt$ : 节点注入有功的导数, 论域为[-20, 5]。

输出量是对系统电压稳定状况的描述, 定义为动态电压稳定指数(DVSI), 论域为[0,100]。

每个输入和输出模糊变量都选取 3 个模糊子集: 低(L), 中(M)和高(H)。每个子集对应一个隶属函数。隶属函数的选择没有固定的规则和模式, 以各指标的特性作为基础。为简便起见, 所有模糊子集都选取三角形或梯形隶属函数。针对 IEEE 39 节点系统, 输入和输出量的隶属函数如图 6 所示。

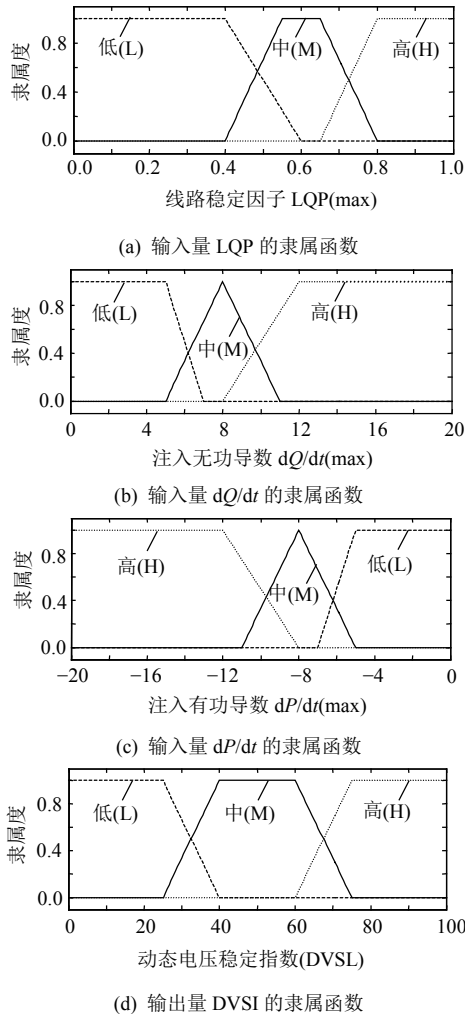


图 6 输入和输出量的隶属函数

Fig. 6 Membership function for output variable and input

输入输出量的模糊分布确定后, 根据电压崩溃发生时各指标的变化特征可建立模糊规则。当 LQP 接近 1.0 时, 该线路到达传输能力极限。当  $dQ/dt$

和  $dP/dt$  远大于正常值时, 标志着动态负荷失稳。3 个输入量各有 3 个模糊子集, 进行组合搭配后, 可设立 18 条模糊推理规则, 如表 1 所示。

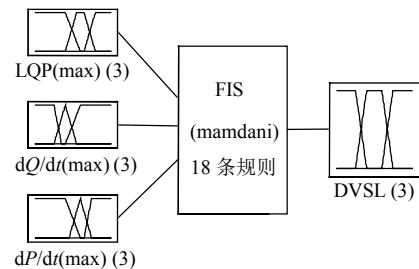
表 1 模糊逻辑的规则

Tab. 1 Fuzzy logic rules

输入			输出
LQP	$dQ/dt$	$dP/dt$	DVSI
H	—	—	H
—	H	H	H
M	M	H	H
M	H	M	H
M	H	L	M
M	L	H	M
M	M	M	M
M	M	L	M
M	L	M	M
M	L	L	M
L	H	L	M
L	L	H	M
L	H	M	M
L	M	H	M
L	M	M	M
L	M	L	L
L	L	M	L
L	L	L	L

L: low; M: medium; H: high.

每条规则都会得到一个输出模糊集合, 将它们聚集成一个总模糊集合并对它进行解模糊处理, 得到一个清晰值 DVSI。本文采用 Matlab 提供的中位数法进行解模糊运算。模糊推理系统如图 7 所示。



FIS: 3 个输入量, 1 个输出量, 18 条规则。

图 7 模糊推理系统

Fig. 7 Fuzzy inference system

DVSI 可以衡量一个区域的电压稳定状况, 变化范围为 0~100。当 DVSI 的值接近 100 时, 该 VCA 接近电压稳定极限。根据 DVSI 的大小, 报警系统会给出不同程度的报警信号, 如表 2 和图 8 所示, 电压稳定水平(VSL)指标可定义为:

- 1)  $DVSI \geq D_H$ , VSL=4, 警报级别为高度危险。
- 2)  $D_M \leq DVSI < D_H$ , VSL=3, 警报级别为中度危险。
- 3)  $D_L \leq DVSI < D_M$ , VSL=2, 警报级别为低度危险。

4)  $DVSI \leq D_L$ ,  $VSL=1$ , 警报级别为安全。

其中,  $D_H$ ,  $D_M$  和  $D_L$  为不同警报级别的阈值, 它们的大小会影响警报系统的保守度。本文设定  $D_H=80$ ,  $D_M=60$ ,  $D_L=40$ 。

表2 4个警报级别

**Tab. 2 Four degrees of alarm**

警报级别	高度危险	中度危险	低度危险	安全
VSL	4	3	2	1
DVSI	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[0,40]

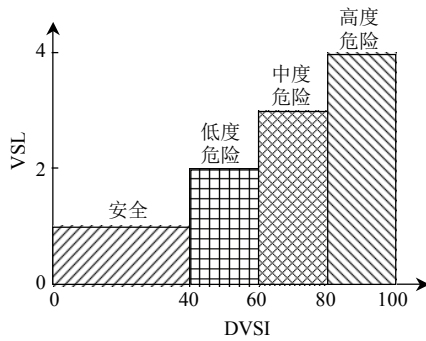


图8 4个警报级别

Fig. 8 Four degrees of alarm

### 3 仿真结果与分析

本文采用如图9所示的 IEEE39 节点新英格兰测试系统作为研究对象, 用2个仿真事件来验证电压崩溃警报系统的可行性和有效性。该系统有10个发电机节点, 19个负荷节点和34条线路。负荷包括2部分: 静态负荷和动态负荷(异步电动机)。

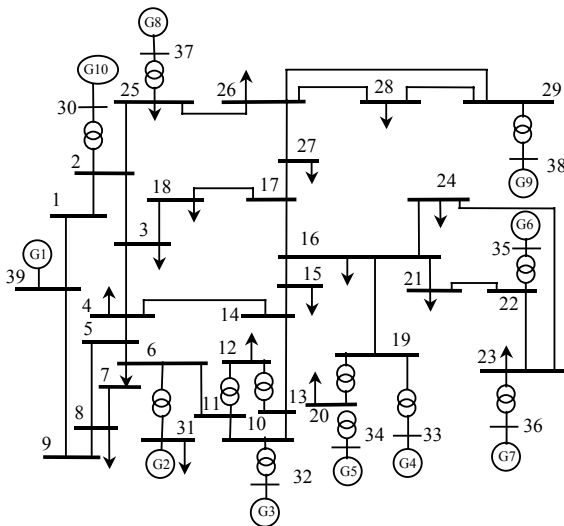


图9 IEEE 39节点新英格兰测试系统

Fig. 9 IEEE 39-bus New England test system

仿真事件1: 未到达传输能力极限。异步电动机在每个负荷节点所占的比重为40%(电压崩溃发生时, 所有线路的LQP均小于1.0)。按初始功率比增加所有节点的静态负荷。

针对该系统建立一个电压崩溃警报系统, 首先

计算出所有线路的LQP值以及所有节点的  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  值, 把它们的最大值作为电压崩溃警报系统的输入量。把3个输入量导入模糊推理系统中, 使用 Matlab 模糊逻辑工具箱建立隶属函数和模糊规则, 经过模糊化、模糊推理器、解模糊的过程后, 得到输出量 DVSI。根据 DVSI 的大小给出4种不同程度的电压稳定级别 VSL, 分别是: 安全 ( $VSL=1$ ), 低度危险 ( $VSL=2$ ), 中度危险 ( $VSL=3$ ) 和高度危险 ( $VSL=4$ )。系统中最早停转的异步电动机在节点24, 停转时间为6.6s, 即发生电压崩溃的时间。 $dQ/dt$ ,  $dP/dt$ , LQP, DVSI 和 VSL, 以及节点24的电压和节点24上电动机转差率的仿真结果如图10所示。

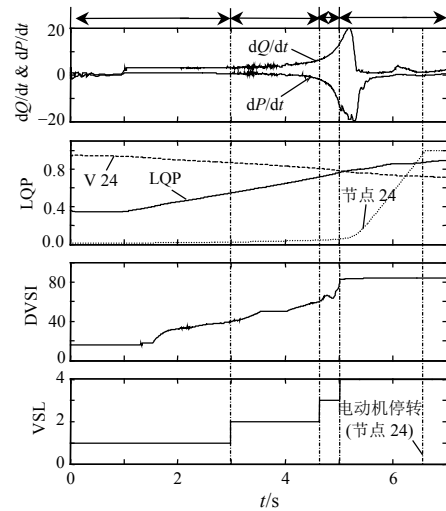


图10 LQP, DVSI 和 VSL 仿真结果(事件1)

Fig. 10 Response of LQP, DVSI and VSL (case 1)

从仿真结果看, 系统的电压稳定状况在3s由安全升级为低度危险, 4.6s由低度危险升级为中度危险, 5s由中度危险升级为高度危险。3个临界状态下输入量 LQP、 $dQ/dt$  和  $dP/dt$  的值如表3所示。

表3 临界点输入量的值(事件1)

Tab. 3 The value of input variables at critical point (case 1)

临界点	安全	低度危险	中度危险
	到低度危险	到中度危险	到高度危险
时间/s	3	4.6	5
LQP	0.54	0.72	0.76
$dQ/dt$	4.5	6.4	16.1
$dP/dt$	2.2	4.4	-13.2

从输入量的变化来看, 开始时 LQP 的值较低,  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  也很小, 根据表1, 得到的 DVSI 也比较小, 系统处于安全状态。之后 LQP 缓慢增大, 得到的 DVSI 也变大, 3s时  $DVSI > D_L$ , 警报级别变为低度危险。LQP 继续增大,  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  也缓慢

增长, 4.6 s 时  $DVSI > D_M$ , 系统进入中度危险状态。之后  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  增长速度加快, 5 s 时已经出现明显的变化,  $DVSI$  也随之超过  $D_H$ , 警报级别升级为高度危险。节点 24 的电动机停转时(6.6 s), 系统中所有线路 LQP 的最大值还没有到达 1.0, 而电压崩溃报警系统在 5.0 s 时的警报级别已升级为高度危险( $VSL=4$ )。因此, 该报警系统可以对发生在传输极限之前的电压崩溃给出有效的警报。

仿真事件 2: 发生在传输极限之后 (电压崩溃发生之前已经有一条线路的 LQP 到达 1.0)。

异步电动机在每个负荷节点所占的比重为 40%。按初始功率比增加所有节点的静态负荷。系统中最早停转的异步电动机在节点 28, 停转时间为 101.06 s, 即发生电压崩溃的时间。在此之前, 大约在 100.69 s 时系统中所有线路 LQP 的最大值已经到达 1.0, LQP 最早到达 1.0 的线路为节点 28 和节点 29 之间的线路。 $dQ/dt$ 、 $dP/dt$ 、LQP、 $DVSI$  和  $VSL$ , 以及节点 28 的电压和节点 28 上电动机转差率的仿真结果如图 11 所示。

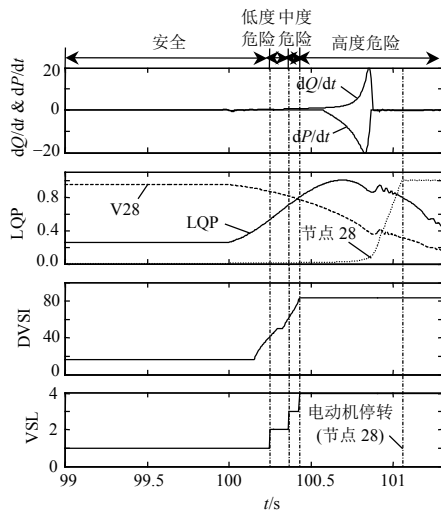


图 11 LQP, DVSI 和 VSL 仿真结果 (事件 2)  
Fig. 11 Response of LQP, DVSI and VSL (case 2)

从图 11 中可以看出, 系统的电压稳定状况在 100.26 s 由安全升级为低度危险, 100.37 s 由低度危险升级为中度危险, 100.43 s 由中度危险升级为高度危险。3 个临界状态下输入量 LQP、 $dQ/dt$  和  $dP/dt$  的值如表 4 所示。

表 4 临界点输入量的值(事件 2)

Tab. 4 The value of input variables at critical point (case 2)

临界点	安全到 低度危险	低度危险到 中度危险	中度危险到 高度危险
时间/s	100.26	100.37	100.43
LQP	0.54	0.73	0.81
$dQ/dt$	0.33	0.49	0.60
$dP/dt$	0.11	0.19	0.24

根据输入量的变化, 开始时 LQP 较小,  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  也很小, 系统处于安全状态。100 s 之后虽然  $dQ/dt$  和  $dP/dt$  没有明显变化, 但 LQP 逐渐增大, 根据表 1 的模糊规则, 输出量  $DVSI$  也随之变大。100.26 s 时  $DVSI > D_L$ , 警报级别升级为低度危险, 100.37 s 时  $DVSI > D_M$ , 系统进入中度危险状态, 100.42 s 时  $DVSI > D_H$ , 警报级别升级为高度危险。节点 28、29 之间的线路 LQP 在 100.69 s 到达 1.0, 节点 28 的电动机在 101.06 s 停转, 电压崩溃发生在传输极限之后。电压崩溃报警系统在 100.43 s 时的警报级别升级为高度危险( $VSL=4$ )。因此, 该报警系统可以对发生在传输极限之后的电压崩溃给出有效的警报。

### 4 结论

本文基于模糊理论建立了一个既考虑静态传输能力极限又考虑负荷动态特性的电压崩溃报警系统。采用模糊逻辑的概念, 把静态电压稳定指标 (LQP) 和负荷动态特性指标 ( $dQ/dt$  和  $dP/dt$ ) 作为输入量, 建立了一个模糊推理系统, 得到动态电压稳定指数 ( $DVSI$ ), 并根据  $DVSI$  的大小划分了不同的警报级别, 得到电压稳定水平 ( $VSL$ ) 对系统的电压稳定状况进行指示。

针对 IEEE 39 节点新英格兰测试系统的仿真算例证明了该报警系统的可行性和有效性。仿真结果显示, 无论是静态功率传输极限还是动态负荷引起的电压崩溃, 该报警系统都可以给出有效的警报。

### 参考文献

- [1] Kirschen D S. Do investments prevents blackouts[C]//IEEE Power Engineering society General Meeting. Tampa, FL: IEEE, 2007: 1-5.
- [2] 屈靖, 郭剑波. “九五”期间我国电网事故统计分析[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 60-63.  
Qu Jing, Guo Jianbo. Statistics and analysis of faults in main domestic power systems from 1996 to 2000[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 60-63(in Chinese).
- [3] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): T2-T6.  
Hu Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): T2-T6(in Chinese).
- [4] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5.  
He Dayu. Rethinking over “8.14” U. S. -Canada blackout after one year[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5(in Chinese).
- [5] 李春艳, 孙元章, 陈向宜, 等. 西欧“11.4”大停电事故的初步分析及防止我国大面积停电事故的措施[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 16-21.

- Li Chunyan, Sun Yuanzhang, Chen Xiangyi, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in Western Europe Power Grid on November 4 and measures to prevent large scale blackout in China [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 16-21(in Chinese).
- [6] 葛睿, 董昱, 吕跃春. 欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 1-6.
- Ge Rui, Dong Yu, Lü Yuechun. Analysis of large-scale blackout in UCTE power grid and lessons to be drawn to power grid operation in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 1-6(in Chinese).
- [7] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York : McGraw-Hill, 1994: 974-977.
- [8] Ohno T, Imai S. The 1987 tokyo blackout[C]//Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA: IEEE PES, 2006: 314-318.
- [9] Cutsem T, Vournas C. Voltage stability of electric power systems [M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998: 4-5.
- [10] Yorino N, Sasaki H, Masuda Y, et al. An investigation of voltage instability problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 600-611.
- [11] Musirin I, Rahman T K A. Novel fast voltage stability index (fvsi) for voltage stability analysis in power transmission system[C]//Student Conference on Research and Development Proceedings. Shah Alam, Malasia: IEEE, 2002: 265-268.
- [12] Moghavvemi M, Omar F M. Technique for contingency monitoring and voltage collapse prediction[J]. IEEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(6): 634-640.
- [13] Moghavvemi M, Faruque M O. Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(1): 58-60.
- [14] Mohamed A, Jasmon G B, Yusoff S. A static voltage collapse indicator using line stability factors[J]. Journal of Industrial Technology, 1989, 7(1): 73-85.
- [15] Parniani M, Vanouni M. A fast local index for online estimation of closeness to loadability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 584-585.
- [16] Althowibi F A, Mustafa M W. Line voltage stability calculations in power systems[C]//IEEE International Conference on Power and Energy. Kuala Lumpur: IEEE, 2010: 396-401.
- [17] Althowibi F A, Mustafa M W. On-line Voltage Collapse Indicator for Power Systems[C]//IEEE International Conference on Power and Energy. Kuala Lumpur: IEEE, 2010: 408-413.
- [18] XiaoYun, Chen Dongmei, Zhao Xuzhang. A novel voltage stability prediction index based on wide area measurement[C]//Beijing Municipal Education Commission. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.
- [19] Pal M K. Voltage stability conditions considering load characteristics [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 243-249.
- [20] 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, 2004: 51-53.
- [21] Liu Peng. Study on the voltage stability of induction motor load[C]//Power Systems Conference and Exposition IEEE PES. Beijing, China: IEEE, 2004: 295-298.
- [22] Zhou D Q, Annakkage U D, Rajapakse A D. Online monitoring of voltage stability margin using an artificial neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1566-1574.
- [23] Huang Xiaohua, Zhang Guomin, Xiao Liye. Optimal location of SMES for improving power system voltage stability[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1316-1319.
- [24] Marannino P, Berizzi A, Merlo M, et al. A rule-based fuzzy logic approach for the voltage collapse risk classification[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Pavia: IEEE, 2002: 876-881.
- [25] Zhang Jing, Guo Yunfeng, Yang Minghao. Assessment of voltage stability for real-time operation[C]//Power India Conference. New Delhi: IEEE, 2006: 5-8.
- [26] Tso S K, Zhu T X, Zeng Q Y, et al. Fuzzy reasoning for knowledge-based assessment of dynamic voltage security[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 1996, 143(2): 157-162.
- [27] Zhang Xi, Wong Chi Kong. Comparison of voltage stability indexes considering dynamic load[C]//Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Macau, China: IEEE, 2011: 249-254.
- [28] Negnevitsky M. Artificial intelligence-a guide to intelligent systems [second edition[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 2002: 25-33.
- [29] Pedrycz W, Gomide F. An introduction to fuzzy sets analysis and design[M]. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1998: 73-78.



张希

收稿日期: 2012-06-08.

作者简介:

张希(1988), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定预警, E-mail: xxbb212@gmail.com;

黄志刚(1968), 男, 博士, 助理教授, 主要研究方向为电力系统分析、基于 GPS 的系统动态安全监测;

黄民聪(1969), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子、电能质量补偿以及 FACTS 与 DFACTS;

戴宁怡(1979), 女, 博士, 助理教授, 主要研究方向为电力电子与电能质量补偿。

(责任编辑 王晔)