

一种量化评估暂态电压稳定性的指标与方法

侯建兰¹, 刘育权^{2,3}, 谢小荣⁴, 叶 萌³, 孙英云¹, 王 珂³, 张 尧²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 3. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620;

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

摘要: 暂态电压稳定问题对系统安全稳定运行提出了严峻挑战, 研究一种量化评估实际系统暂态电压稳定性的方法具有重要意义。在电力行业标准中大扰动情况下暂态电压稳定判据的基础上提出电压暂降指标, 包括电压暂降严重性指标和电压合格性指标, 涉及单一故障下节点电压暂降指标、多故障集下节点电压暂降指标以及系统电压暂降指标, 并以此评估实际电网中任意节点或整个系统的暂态电压稳定性。算例分析采用广州电网 2016 年规划数据, 利用 PSD-BPA 进行时域仿真, 仿真分析结果体现了故障类型、负荷模型对暂态电压稳定性的影响, 及所提指标用于量化评估实际系统暂态电压稳定性的直观性与有效性。

关键词: 时域分析; 仿真; 暂态电压稳定; 感应电动机; 指标; 暂态; 稳定性; 评估

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.023

0 引言

近年来, 国内外发生的电压失稳乃至崩溃事故造成了严重的经济损失和不良的社会影响, 对电力系统安全评估提出了新的挑战^[1-4]。不少电压崩溃事故源于电力系统在某个运行状态下受到大的干扰后系统电压发生较大偏移, 此时由于感应电动机、高压直流(HVDC)装置等具有快速动态响应特性设备的影响导致系统失去稳定^[5], 属于暂态电压失稳。

目前, 国内外学者对电力系统暂态电压稳定性的研究方法主要有扩展等面积法、暂态函数能量法、时域仿真法以及基于风险的评估方法等^[6-13]。文献[6]结合时域仿真提出了单机加速面积与减速面积计算方法, 并根据临界机组群中单机加速面积与减速面积给出了多机系统等面积稳定判别准则。文献[7]根据带约束动力系统稳定域理论, 其受限稳定边界由边界上不稳定平衡点、周期轨和半鞍点的稳定流形以及部分可行域边界构成。根据电力系统结构保持模型, 寻找到和故障相关的一个半鞍点, 然后以该点能量作临界能量, 保证故障后系统满足暂态电压跌落约束。该方法的不足之处在于半鞍点的选取不合适或者所选取能量函数本身的局限性, 可能导致分析产生较大误差。文献[8-10]考虑客观运行条件和故障等多种不确定因素的影响, 将随机因素与概率分析观点引入暂态分析, 提出了基于风险的暂态电压稳定性评估方法, 将防止系统暂态电压崩溃

而采取的控制措施所造成的控制成本作为系统失去暂态稳定性的严重度。然而该方法包含两方面困难: 一方面是预估某特定发电机或负荷停电对应的损失; 另一方面在于如何识别预想故障下哪些发电机或负荷会停电以及停电的持续时间。

评估系统暂态电压稳定性的关键在于找出一种合理、实用的评价指标, 文献[14]以容易引起暂态电压失稳的电动机电磁转矩-滑差曲线为基础, 将故障后的极限切除时间作为系统暂态电压稳定性的衡量指标。由于实际系统中难以获取每一台电动机的电磁转矩-滑差曲线, 该方法难以应用于评估实际系统的暂态电压稳定性。

本文以暂态电压稳定的实用判据为基础, 提出了评估系统暂态电压稳定性的电压暂降指标, 包括单一故障下节点电压暂降指标、多故障集下节点电压暂降指标以及系统电压暂降指标, 并给出了将指标应用于实际系统的暂态电压稳定性分析方法。指标的计算可直接利用实际系统运行过程中进行的故障时域仿真结果数据, 无需额外的仿真分析。广州电网的算例分析结果体现了不同故障类型、不同负荷模型对系统暂态电压稳定性的影响差异, 表明了所提指标应用于评估实际系统暂态电压稳定性的有效性与实用性。

1 电压暂降指标

根据 2013 年发布, 并于同年 8 月实施的电力系统安全稳定计算技术规范^[15]的相关描述, 电力系统暂态电压稳定性判据为: 在电力系统受到扰动后的暂态过程中, 负荷母线电压能在 10 s 内恢复到 0.8 p.u. 以上。此外, 技术规范建议在实际应用该判据时,

收稿日期: 2014-08-08; 修回日期: 2015-06-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-050216)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA-050216)

可将电压检测点选择在负荷母线处。本文旨在研究电力系统暂态电压稳定性,因此所提量化评估指标不考虑中长期电压稳定。

实用判据包含了故障切除后负荷电压跌落的可接受程度,即低于 0.8 p.u. 的持续时间不超过 10 s。以此判据为基础,提出能够反映电压暂降严重性程度的指标,包括电压暂降严重性指标和电压合格性指标两部分。

1.1 单个故障的节点电压暂降指标

在大扰动故障发生后,系统各母线电压发生偏移,故障切除后母线电压低于限定值的持续时间是衡量故障严重性和系统暂态稳定性的关键所在。设当发生故障 i 时节点 j 的动态电压为 $U_{ij}(t)$,则电压暂降严重性指标 $S_{ei,j}$ 、电压合格性指标 $F_{pi,j}$ 分别定义为式(1)和(2):

$$S_{ei,j} = D_{i,j} + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t_1} (0.95 - U_{ij}(t)) dt$$

$$D_{i,j} = \begin{cases} p & U_{ij}(t) < 0.8 \text{ p.u. 且 } \Delta t_2 > 10 \text{ s} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{pi,j} = \begin{cases} 0 & U_{ij}(t) < 0.8 \text{ p.u. 且 } \Delta t_2 > 10 \text{ s} \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中,电压暂降严重性指标 $S_{ei,j}$ 包含惩罚函数和积分两部分, $D_{i,j}$ 为罚函数,对不满足电压稳定判据的惩罚值为 $p(p > 0)$,其具体取值可根据不同的系统以及时域仿真情况进行调整,取值原则为保证罚函数取值远大于积分项的数值,以明显区分满足与不满足暂态电压稳定判据的节点电压暂降严重性程度,积分项表示低于 0.95 p.u. 的面积,0.95 p.u. 为考虑用电设备允许电压偏移量 $\pm 5\%$ 而设定的负荷侧最低需求电压; t_0 为故障开始的时间; Δt_1 、 Δt_2 分别为故障 i 时节点 j 电压低于 0.95 p.u.、0.8 p.u. 的持续时间;电压合格性指标 $F_{pi,j}$ 根据暂态电压稳定判据来判断故障条件下节点电压是否合格,若电压合格则取值为 1,电压不合格则取值为 0。

罚函数的目的是惩罚不满足暂态电压稳定判据的节点,分为合格和不合格 2 档;若节点 j 不满足暂态电压稳定判据,即扰动后的暂态过程中负荷母线电压下降持续低于 0.8 p.u. 的时间超过 10 s,惩罚为 p ;根据暂态电压稳定判据其他情况视为电压稳定,罚函数取值为 0。

式(1)表明那些具有长的暂降持续时间和小的暂降幅值的故障具有较高的暂降严重性指标,因而严重性指标能够表征故障的实际影响程度。

定义式(1)和(2)中的节点电压动态 $U_{ij}(t)$ 可通过时域仿真得到。因此,上述 $S_{ei,j}$ 的具体实现采用时域仿真得到的数据,其中积分计算也可改为求和公式,即式(1)可等效为式(3):

$$S_{ei,j} = D_{i,j} + \Delta T \sum k_{i,j}(t) (0.95 - U_{ij}(t))$$

$$k_{i,j}(t) = \begin{cases} 0 & U_{ij}(t) > 0.95 \text{ p.u.} \\ 1 & U_{ij}(t) \leq 0.95 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (3)$$

$$D_{i,j} = \begin{cases} p & U_{ij}(t) < 0.8 \text{ p.u. 且 } \Delta t_2 > 10 \text{ s} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中, ΔT 为时域仿真计算步长; $k_{i,j}(t)=0$ 表示故障 i 条件下节点 j 在 t 时刻的电压大于 0.95 p.u., $k_{i,j}(t)=1$ 表示电压小于等于 0.95 p.u.。

1.2 多个故障集下的节点电压暂降指标

对于系统中的一个节点,不能简单地从一次故障后节点电压恢复情况判断其暂态电压稳定性,需要综合考虑多个典型故障后节点电压恢复情况。因此,需设定一个典型故障集,该故障集包含多个故障,在考虑 M 个典型故障下,任一节点 j 的电压暂降严重性指标 $S_{e\Sigma,j}$ 和电压合格性指标 $F_{p\Sigma,j}$ 如式(4)所示:

$$S_{e\Sigma,j} = \sum_{i=1}^M w_i S_{ei,j} = \sum_{i=1}^M w_i [D_{i,j} + \Delta T \sum k_{i,j}(t) (0.95 - U_{ij}(t))] \quad (4)$$

$$F_{p\Sigma,j} = \prod_{i=1}^M F_{pi,j}$$

其中,考虑 M 个典型故障的节点电压合格性指标 $F_{p\Sigma,j}$ 是所有故障形势下节点 j 电压合格性指标 $F_{pi,j}$ 的连乘运算,其含义为当且仅当节点 j 在所有典型故障下暂态电压均合格时满足 $F_{p\Sigma,j}=1$,只要在某一故障下节点暂态电压不合格,则认为该节点暂态电压不合格,此时 $F_{p\Sigma,j}=0$; w_i 为故障 i 的权重值,满足式(5)。

$$\sum_{i=1}^M w_i = 1 \quad (5)$$

故障集中的故障可根据发生概率和严重性,采用不同的权重。例如,若将所给典型故障分为 $N-1$ 故障和 $N-2$ 故障,考虑到 $N-1$ 故障发生的概率比 $N-2$ 故障大,假设在进行计算时 $N-1$ 故障的权重设为 $N-2$ 故障的 α 倍,前 k 个为 $N-1$ 故障,后 $M-k$ 个为 $N-2$ 故障,设 $N-2$ 故障的权重为 w_2 ,结合式(5)求解出 $w_2 = \frac{1}{M + (\alpha - 1)k}$,则式(4)变形为式(6):

$$S_{e\Sigma,j} = \sum_{i=1}^M w_i S_{ei,j} = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha}{M + (\alpha - 1)k} S_{ei,j} + \sum_{i=k+1}^M \frac{1}{M + (\alpha - 1)k} S_{ei,j} \quad (6)$$

$$F_{p\Sigma,j} = \prod_{i=1}^M F_{pi,j}$$

评估系统中各节点的电压暂降严重性程度,可将各节点的电压暂降严重性指标进行排序, $S_{e\Sigma,j}$ 越大,说明该母线故障情况下电压暂降越严重,暂态电压稳定性越差。根据 $F_{p\Sigma,j}$ 取值评估节点暂态电压是否稳定,取值为 1 表明该节点暂态电压稳定,反之则不稳定。

1.3 系统电压暂降指标

系统电压暂降指标需要综合考虑系统中需要重点关注的所有负荷节点。因此故障 i 时系统的电压暂降严重性指标 $S_{ei,\Sigma}$ 与电压合格性指标 $F_{pi,\Sigma}$ 以及系统电压合格率 $P_{ni,\Sigma}$ 定义为式(7):

$$\begin{aligned} S_{ei,\Sigma} &= \sum_{j=1}^N \varphi_j S_{ei,j} = \\ &= \sum_{j=1}^N \varphi_j [D_{i,j} + \Delta T \sum k_{i,j}(t) (0.95 - U_{i,j}(t))] \\ F_{pi,\Sigma} &= \sum_{j=1}^N F_{pi,j} \\ P_{ni,\Sigma} &= \frac{F_{pi,\Sigma}}{N} \times 100\% \end{aligned} \quad (7)$$

其中,电压合格性指标 $F_{pi,\Sigma}$ 表示在系统所关注的 N 个节点中电压合格的总节点数;电压合格率 $P_{ni,\Sigma}$ 表示电压合格的节点占所关注节点总数的百分比; φ_j 为节点 j 的权重值,考虑到 10.5 kV 负荷母线的重要性基本一致,其值取为 $1/N$ 。

综合所有故障后系统的电压暂降严重性指标 S_e 与电压合格性指标 F_p 以及电压合格率 P_r 如式(8)所示:

$$\begin{aligned} S_e &= \sum_{i=1}^M w_i S_{i,\Sigma} = \sum_{i=1}^M w_i \sum_{j=1}^N \varphi_j S_{ei,j} = \\ &= \sum_{i=1}^M w_i \sum_{j=1}^N \varphi_j [D_{i,j} + \Delta T \sum k_{i,j}(t) (0.95 - U_{i,j}(t))] \\ F_p &= \sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^M F_{pi,j} \\ P_r &= \frac{F_p}{N} \times 100\% \end{aligned} \quad (8)$$

根据系统的电压暂降指标公式推导可知,电压暂降严重性指标的数值可反映暂态电压稳定性,数值越大,稳定性越差。电压合格性指标能够表示系统暂态电压是否完全稳定,若数值为 N ,即所有被关注节点暂态电压均合格,则暂态电压稳定,反之则暂态电压失稳。电压合格率表示系统中暂态电压合格的百分数。

与现有的指标^[16]相比,本文所提出的指标具有以下优势:

- 可对节点和系统进行电压暂降严重性评估;
- 暂态电压严重性可全面分析综合考虑各种典型故障;
- 通过电压合格性指标明确给出节点和系统暂态稳定与失稳的界限;
- 在同一故障下,可横向比较系统中各节点在该故障下的电压暂降严重性程度;
- 通过比较同一节点在不同故障下的严重性指标,可判断该节点与故障发生点的联系紧密程度,严重性指标数值越大,越容易失稳,表明此故障对所研

究节点影响越大;

f. 通过比较不同故障形式下的系统电压暂降严重性指标,可评估各类故障对系统的影响程度,系统电压暂降严重性指标越大,说明该故障越容易引起暂态电压失稳或者引起电压失稳的范围越大。

2 暂态电压稳定性评估方法

暂态电压稳定性评估方法包括前期的数据设定、时域仿真分析、电压暂降严重性指标与电压合格性指标计算以及暂态电压稳定性判断。

将电压暂降指标应用于实际电网进行暂态电压稳定性评估的流程如图 1 所示,具体实施步骤如下。

步骤 1: 收集电网运行数据,包含系统元件参数、网络拓扑结构信息、负荷情况等。

步骤 2: 根据实际需要,对所研究电网分析设定运行方式集 O_s 、典型故障集 F_s 以及节点集 N_s 。

步骤 3: 采用 PSD-BPA 时域仿真分析软件分别对特定运行方式下各故障进行时域仿真分析,记录所研究节点在故障发生后的电压情况。

步骤 4: 根据故障后节点电压的时域仿真结果,采用 MATLAB 进行电压暂降严重性指标和电压合格性指标计算。

步骤 5: 根据电压合格性指标计算结果,判断节点和系统的暂态电压稳定性。

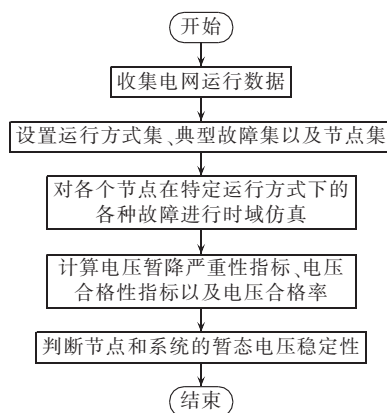


图 1 暂态电压稳定性评估流程图

Fig.1 Flowchart of transient voltage stability assessment

3 算例分析

3.1 算例简介

为了验证本文所提指标用于评价实际电网暂态电压稳定性的量化性与有效性,算例采用广州电网 2016 年规划数据。2016 年广州电网以北郊、木棉、花都、增城、狮洋和广南 6 个 500 kV 变电站作为主要支撑。本文重点研究不同故障类型、不同电动机负荷比例对暂态电压稳定性的影响。

以 500 kV 线路 $N-1$ 故障和 500 kV 线路 $N-2$

故障为典型故障进行电网暂态电压稳定性分析。具体为:故障 1,北郊—花都线路花都侧发生三相短路,0.1 s 后跳单回线路;故障 2,花都—从西换流站线路从西侧发生三相短路,0.1 s 后断开双回线路。

算例综合负荷模型是感应电动机负荷+恒阻抗负荷,根据构成比例不同分以下几种模型进行仿真分析以及电压暂降指标计算,如表 1 所示。

表 1 不同的综合负荷模型
Table 1 Different integrated load models

模型	感应电动机比例/%	恒阻抗负荷比例/%
1	50	50
2	55	45
3	60	40
4	65	35

具体感应电动机负荷参数如下:转子电阻 $R_R=0.02$ p.u.,定子电抗 $X_s=0.18$ p.u.,转子电抗 $X_R=0.12$ p.u.,惯性时间常数 $T_J=2$ s,初始滑差 $S_0=0.0116$ p.u.。

3.2 广州电网暂态电压稳定性分析

3.2.1 时域仿真分析

以广州林和变电站 10.5 kV 负荷母线为例,采用相同的综合负荷模型,在发生故障 1、故障 2 时其母线电压(标么值,后同)如图 2 所示。从图中可知,故障 2 对林和暂态电压的影响大于故障 1,尤其在负荷模型采用 55% 电动机+45% 恒阻抗的综合模型 2 时差异明显,故障 1 切除后母线电压最终能恢复到稳态水平,而故障 2 切除后母线电压一直保持在 0.4 p.u. 左右,发生暂态电压失稳。

故障 1、故障 2 在表 1 所述的各种综合负荷模型下的仿真结果图 3 所示。其中,图 3(a)、(c)分别

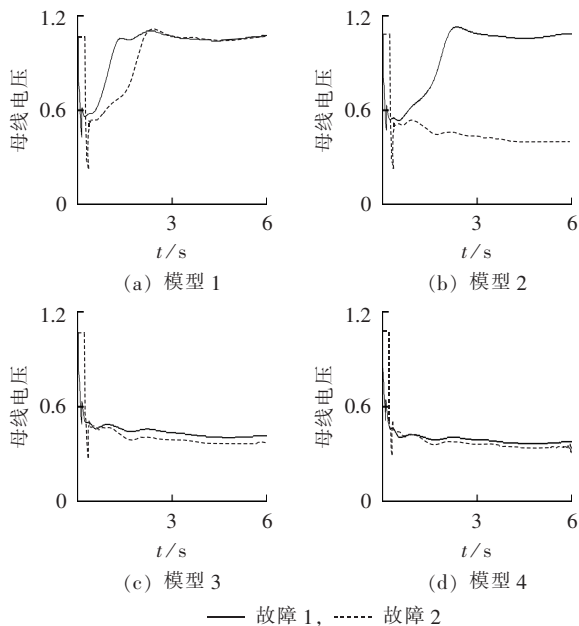


图 2 相同负荷模型条件下不同故障时母线暂态电压对比
Fig.2 Comparison of transient bus voltage between different faults in same load model condition

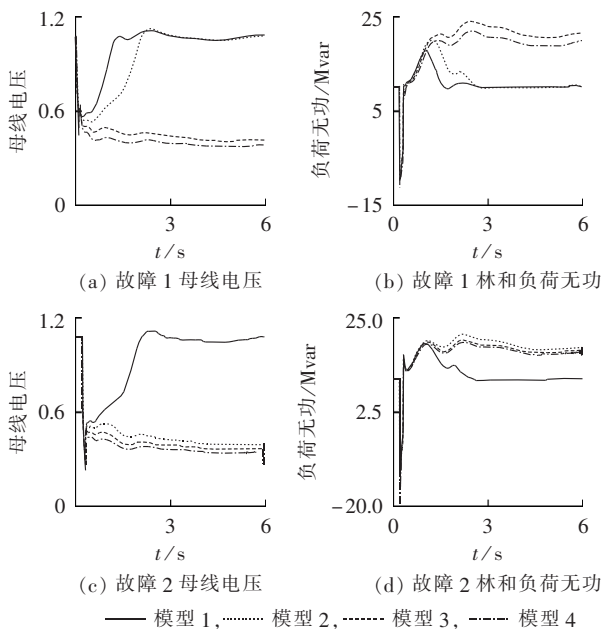


图 3 相同故障条件下不同负荷模型时域仿真对比

Fig.3 Comparison of time domain simulation among different load models in same fault condition

为故障 1、故障 2 时林和站 10.5 kV 母线电压,图 3 (b)、(d)分别为故障 1、故障 2 时林和站负荷无功的变化情况。

从图 3 可看出电动机负荷比例越大,故障后暂态电压降落越严重,由图 3(c)可简单判断出在故障 2 条件下开始引起林和母线暂态电压失稳的综合负荷模型为:55% 电动机+45% 恒阻抗。

3.2.2 电压暂降指标计算与暂态电压稳定性分析

作为一个大型电网,通过观察每条母线的电压来判断系统暂态电压稳定性不具备可实现性。采用本文提出的单一故障节点电压暂降指标计算方法,以林和 10.5 kV 母线为例,计算出故障 1、故障 2 时在各种负荷模型下的电压暂降严重性指标,根据经验,在电压暂降指标计算中罚函数取值 $p=10$;采用多故障集下节点电压暂降指标计算方法,计算出综合考虑故障 1、故障 2 时林和 10.5 kV 母线的节点总指标,且故障 1 的权重取为故障 2 的 2 倍,即式(6)中 $\alpha=2$ (下同)。林和 10.5 kV 母线的电压暂降指标计算结果如表 2 所示。

表 2 林和 10.5 kV 母线的电压暂降严重性指标
Table 2 Voltage sag severity index of Linhe 10.5 kV bus

故障	母线电压暂降严重性指标			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
故障 1	0.3007	0.5617	17.8933	18.4646
故障 2	0.5217	18.0702	18.4899	18.8260
节点总指标	0.3744	6.3979	18.0922	18.5851

由于电压暂降严重性指标超过惩罚函数值 10 的属于暂态电压失稳,因此从表中数据可知,在电动

机负荷比例达到 55% 及以上时,林和 10.5 kV 母线发生失稳。

按照系统电压暂降指标计算方法算出故障 1、故障 2 在不同电动机比例负荷模型时的系统电压暂降严重性指标、系统电压合格率分别如表 3、表 4 所示。

表 3 系统电压暂降严重性指标
Table 3 System voltage sag severity index

故障	系统电压暂降严重性指标			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
故障 1	0.098 5	0.145 7	3.266 7	4.142 3
故障 2	0.098 3	3.244 3	3.327 2	3.392 1
系统总指标	0.098 4	1.178 6	3.286 9	3.892 2

表 4 系统电压合格率
Table 4 System voltage qualification rate

模型	系统电压合格率/%	模型	系统电压合格率/%
1	100.0	3	81.6
2	81.6	4	77.2

从表 3 中数据可知,随着电动机负荷比例的增加系统总电压暂降严重性指标数值增大,表明电动机比例越大越易引起系统暂态电压失稳。由表 4 可知,系统电压合格率也随电动机比例增加而下降,由此从另一侧面证明了感应电动机负荷对系统暂态电压稳定性的重要影响。

4 结语

为定量评估实际大规模电网暂态电压稳定性,本文提出了基于电压暂降指标的量化评估方法。根据电力行业大扰动下暂态电压稳定判据提出了电压暂降指标,包括电压暂降严重性指标和电压合格性指标,主要用于评价节点或系统在各种故障形式下的暂态电压稳定性,并且可用于研究不同电动机负荷比例对系统暂态稳定性的影响。广州电网综合负荷模型中电动机负荷比例达到 55% 及以上时,故障切除后系统发生暂态电压失稳。

通过广州电网 2016 年规划数据的仿真分析与计算,详细说明了本文所提方法具有简洁、定量、准确等优点,适用于工程上快速对电网暂态电压稳定性进行量化评估。

参考文献:

[1] 伦涛,韩鹏飞,贺静波,等. 近年国外大停电事故概述及分析[J]. 中国能源,2012,34(2):41-43.

[2] 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):2-6.

HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America Power Grid[J]. Power System Technology,2003,27(9):2-6.

[3] MAKAROV Y V,RESHETOV V I,STROEV A,et al. Blackout

prevention in the United States,Europe,and Russia[J]. Proceedings of the IEEE,2005,93(11):1942-1955.

[4] ANDERSSON G,DONALEK P,FARMER R,et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe,and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1922-1928.

[5] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥. 感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J]. 电力系统自动化,1996,20(6):12-15.

XU Taishan,XUE Yusheng,HAN Zhenxiang. Quantitative analysis for transient voltage instability caused by induction motors[J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(6):12-15.

[6] 吴政球,荆勇. 基于时域仿真的暂态裕度灵敏度分析[J]. 中国电机工程学报,2001,21(6):19-24.

WU Zhengqiu,JING Yong. Transient stability sensitivity based on time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(6):19-24.

[7] 陈磊,闵勇. 考虑暂态电压跌落限制的直接法暂态稳定分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(21):6-10.

CHEN Lei,MIN Yong. Transient stability analysis of power system by direct method considering transient voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(21):6-10.

[8] 周启航,张东霞,郭强. 基于风险的电力系统暂态电压崩溃评估[J]. 电网技术,2011,35(8):119-123.

ZHOU Qihang,ZHANG Dongxia,GUO Qiang. Risk based assessment on transient voltage collapse in power grid[J]. Power System Technology,2011,35(8):119-123.

[9] 赵珊珊,仲悟之,张东霞,等. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):1-4.

ZHAO Shanshan,ZHONG Wuzhi,ZHANG Dongxia,et al. A transient voltage instability risk assessment method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(19):1-4.

[10] 薛禹胜,刘强,袁越. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(14):1-6.

XUE Yusheng,LIU Qiang,YUAN Yue. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(14):1-6.

[11] OBADINA O O,BERG G J. Determination of voltage stability limit in multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1988,3(4):1545-1554.

[12] VU K T,LIU C C. Shrinking stability regions and voltage collapse in power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Fundamental Theory and Applications,1992,39(4):271-289.

[13] 卢锦玲,石少通,徐超,等. 含大型风电场系统暂态电压稳定性分析[J]. 华北电力大学学报,2014,41(1):45-52.

LU Jinling,SHI Shaotong,XU Chao,et al. Transient voltage stability analysis in the large-scale wind power integrated system[J]. Journal of North China Electric Power University,2014,41(1):45-52.

[14] 袁志昌,刘文华,宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):17-21.

YUAN Zhichang,LIU Wenhua,SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic Var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):17-21.

- [15] 国家能源局. DL/T-1234—2013 电力系统安全稳定计算技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [16] 林焱,吴丹岳,章雪萌,等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(3):147-152.
- LIU Yan,WU Danyue,ZHANG Xuemeng,et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control,2010,38(3):147-152.
- [17] 刘文霞,李盈枝,李鹤,等. 考虑经济约束的西部山区风电接纳能力研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):19-24,30.
- LIU Wenxia,LI Yingzhi,LI He,et al. Wind power accommodation capability considering economic constraints for western mountain areas[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):19-24,30.
- [18] 姜欣,陈红坤,向铁元,等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):13-18,25.
- JIANG Xin,CHEN Hongkun,XIANG Tiejuan,et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):13-18,25.
- [19] 任杰桢,鞠平,赵娟,等. 考虑电动机负荷的静态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):139-143.
- REN Jiezhen,JU Ping,ZHAO Juan,et al. Static voltage stability analysis considering motor loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):139-143.

作者简介:



侯建兰

侯建兰(1990—),女,四川德阳人,硕士研究生,主要研究方向为电压稳定、新能源发电(E-mail:HouJL@ncepu.edu.cn);

刘育权(1971—),男,湖南株洲人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统调度运行与控制;

谢小荣(1975—),男,湖南邵阳人,副教授,博士,主要研究方向为柔性输电技术、WAMS和次同步谐振等(E-mail:xiexr@tsinghua.edu.cn);

叶萌(1987—),女,湖北仙桃人,工程师,硕士研究生,主要研究方向为电力系统仿真分析、调度运行与控制(E-mail:yemeng829@126.com);

孙英云(1975—),男,山东烟台人,副教授,博士,主要研究方向为新能源接入、电力系统优化与控制(E-mail:sunyy@ncepu.edu.cn);

王珂(1979—),男,河南安阳人,高级工程师,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与管理(E-mail:wangke777@126.com);

张尧(1948—),男,广东湛江人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析与控制、电压稳定性等。

Quantitative assessment index and method of transient voltage stability

HOU Jianlan¹,LIU Yuquan^{2,3},XIE Xiaorong⁴,YE Meng³,SUN Yingyun¹,WANG Ke³,ZHANG Yao²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

3. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China;

4. State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Since the transient voltage stability presents great challenge to the safe and stable operation of system, it is of great significance to research the quantitative assessment method for the transient voltage stability of actual system. The voltage sag indexes, including the voltage sag severity index and the voltage sag eligibility index, are proposed based on the transient voltage stability criteria stipulated in electric power industry standard for large disturbance conditions. Classified into single-fault one-node voltage sag index, multi-fault one-node voltage sag index and system voltage sag index, they are applied to assess the transient voltage stability of any node or whole system for actual power grid. Case analysis adopts the data planned for 2016' Guangzhou Power Grid and applies the PSD-BPA time domain simulation. The simulative results show the impacts of fault type and load model on the transient voltage stability, as well as the intuition and effectiveness of the proposed indexes in the quantitative assessment of transient voltage stability for actual system.

Key words: time domain analysis; computer simulation; transient voltage stability; induction motors; index; transients; stability; assessment