

电力系统电压稳定机理研究

汤涌, 仲悟之, 孙华东, 林伟芳, 易俊, 张鑫

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Study on Mechanism of Power System Voltage Stability

TANG Yong, ZHONG Wu-zhi, SUN Hua-dong, LIN Wei-fang, YI Jun, ZHANG Xin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: It is the key problem for further development of the research on voltage stability to correctly understand the mechanism of power system voltage stability. On the basis of analyzing both the definition of voltage stability and its mathematical models, the definitions of voltage stability and voltage collapse with determinate physical meanings are given. The voltage stability mechanisms of pure resistance circuit and AC circuit are researched respectively to explain the mechanism of power system voltage stability, and the voltage stability mechanism of power system is explained in three aspects, i.e., transmission limitation of power network, dynamic characteristics of power load and voltage support at receiving end system.

KEY WORDS: power system; voltage stability; voltage collapse; transient voltage stability

摘要: 正确认识电力系统电压稳定机理是电压稳定研究进一步发展的关键。在分析了电压稳定定义和数学模型后, 给出了物理意义明确的电压稳定和电压崩溃的定义。分别对纯电阻电路和交流电路的电压稳定性机理进行了研究, 说明了电力系统电压稳定性的机理, 并从输电网络输电极限、负荷动态特性以及受端系统电压支撑 3 个方面对电力系统电压稳定进行机理解释。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 电压崩溃; 暂态电压稳定

0 引言

电网可分为送端系统、受端系统和输电网络 3 个部分。受端系统是以负荷集中地区为中心, 包括区内和邻近电厂在内, 用较密集的电力网络将负荷和这些电源联接在一起的电力系统^[1]。受端系统通过接受外部及远方电源输入的有功和电能, 以实现供需平衡。

远距离、大容量的电量交换, 使电力系统规划、建设及受端系统的安全稳定运行及其相关问题得到关注^[2-6]。随着电力工业的快速发展, 受端系统的规模在不断扩大, 近年来国内外许多受端系统都出现了用电负荷迅猛增长、最高用电负荷占全网比重逐渐增加的情况。而受端系统内部主力电厂建设不足, 大量的电能需要远距离传输, 受端系统对外来电力的依赖程度不断提高, 导致电网安全稳定运行的主要矛盾从功角稳定问题转化为电压稳定问题。

在我国电网的发展历程中, 受端系统的安全稳定运行一直是电网规划、建设和运行中关注的主要问题。我国典型大规模受端系统(如京津唐、长三角和珠三角地区)在接受大量外来电力时, 电压稳定问题均受到了广泛关注。随着特高压电网的建成, 我国将形成多个依托于特高压电网的大型受端系统。全面深入地研究大受端系统的安全稳定特性, 尤其是大面积停电事故^[7-12]所暴露出来的受端系统电压稳定性问题, 对于确保大受端系统受得进、落得下、用得上, 保证我国特高压电网的安全稳定运行, 都具有重要指导意义。

1 电压稳定性定义和数学模型

1.1 电压稳定性定义

电压稳定性^[13]是指在给定的初始运行状态下, 电力系统受到扰动后系统中所有母线维持稳定电压的能力。它是一种依赖于负荷需求和系统向负荷供电之间保持/恢复平衡的能力。而电压崩溃是指连锁事故伴随着电压不稳定导致电力系统大面积停电或不正常低电压的一个过程。

文献^[1]定义电压稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后, 系统电压能够保持或恢复到允许范围内, 不发生电压崩溃的能力。电压失稳可表现在

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目) (2004CB217901)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217901).

静态小扰动失稳, 暂态大扰动失稳及大扰动动态失稳或长过程失稳。电压失稳可以发生在正常工况、电压基本正常的情况下, 也可能发生在正常工况、母线电压已明显降低的情况下, 以及在受扰动以后。

上述定义着重从维持系统电压的能力上描述了电压稳定, 基本上是对电压稳定的现象进行描述, 没有说明电压稳定的物理过程和机理。

本文根据电力系统电压稳定性的物理本质和机理, 给出了新的电力系统电压稳定和电压崩溃的定义。电压稳定指当系统向负荷提供的功率随着电流的增加而增加时, 系统处于电压稳定状态; 反之, 系统处于电压不稳定状态。电压崩溃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。

当系统处于电压不稳定状态, 此时系统向负荷提供的功率已不可能随着电流的增加而增加, 而负荷会试图通过加大电流以获得更大功率。这可以从2个方面去说明: 一方面以空调负荷为例, 当气温上升或电压降低或整定温度被调低时, 空调会加大开机时间与停机时间的比值, 其群体效应就是加大所在负荷节点的电流; 另一方面当系统处于电压不稳定状态时, 人们会痛感当下用电器具或设备太不如意, 此时他们会加开用电器具或设备, 或调高现行用电器具、设备的档次或改变其整定值, 这些行为都会加大它们所在负荷节点的电流。如果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), 就会发生一个正反馈式的恶性循环, 最终导致电压崩溃。

1.2 电压稳定性分析的数学模型

电力系统本质上是一个复杂的非线性动力学系统, 它的动态行为可以用含有连续变量和离散变量的微分-代数方程组(differential algebraic equations, DAE)完整描述^[14]。

$$\dot{X} = f(X, Y, Z_c, Z_d) \quad (1)$$

$$0 = g(X, Y, Z_c, Z_d) \quad (2)$$

$$\dot{Z}_c = h_c(X, Y, Z_c, Z_d) \quad (3)$$

$$Z_d(k+1) = h_d(X, Y, Z_c, Z_d(k)) \quad (4)$$

式中: X 为全部的暂态状态变量; Y 为网络方程中的状态变量, 包括节点电压的幅值和相位; Z_c 为连续变化的长期(慢)状态变量; Z_d 为离散变化的长期(慢)状态变量。方程(1)描述了电力系统的暂态行为, 方程(2)描述了系统的网络特性。

为理解电压稳定性的机理和寻求较快的分析方法, 利用短期现象与长期现象之间时间上的可分性是有益的。在研究短期动态时, 可以近似地认为慢变量在快暂态期间是常数, 此时分析暂态电压稳定的数学模型可以简化为

$$\dot{X} = f(X, Y) \quad (5)$$

$$0 = g(X, Y) \quad (6)$$

在暂态时间框架下, 暂态电压稳定模型和暂态功角稳定模型之间的界线不是很明确, 其原因是在定义上暂态电压稳定问题和暂态功角稳定问题就密切相关, 所以认为计及了动静态负荷特性的暂态功角稳定仿真模型可以描述暂态电压稳定性问题。

2 纯电阻电路电压稳定性分析

2.1 简单纯电阻电路电压稳定性算例

图1为简单纯电阻电路。由图1可以得到

$$\begin{cases} P_{Lmax} = E^2 / (4R_S), & R_S = R_L \\ U_{Lcr} = E/2 \end{cases} \quad (7)$$

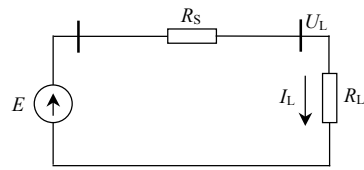


图1 纯电阻电路

Fig. 1 Circuit of pure resistance

假设 $E=10\text{ V}$, $R_S=1\ \Omega$, 则由式(7)可以得到

$$\begin{cases} P_{Lmax} = 10^2 / 4 \times 1 = 25\text{ W} \\ U_{Lcr} = 10/2 = 5\text{ V} \end{cases} \quad (8)$$

现假设纯电阻负荷是变化的, 电路如图2所示。

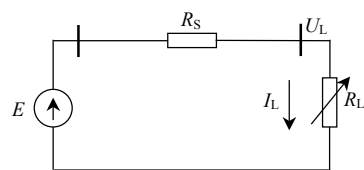


图2 负荷变化的纯电阻电路

Fig. 2 Pure resistance circuit with changed load

由图2可以得到

$$\begin{cases} I_L = E / (R_S + R_L) \\ U_L = \frac{E}{R_S + R_L} R_L \\ P_L = I_L U_L \end{cases} \quad (9)$$

R_L 取不同的值可以得到如表1所示结果。随纯电阻负荷 R_L 变化的系统参数变化曲线如图3所示。

当 $R_L=R_S=1\ \Omega$ 时, 系统的运行点正好对应功率-电压曲线的鼻点, 此时 P_L 达到最大值, 其曲线如图4所示。

表 1 随着负荷 R_L 变化的系统参数变化
Tab. 1 System parameters variety with changed load R_L

R_L/Ω	I_L/A	U_L/V	P_L/W
49	0.2	9.8	1.96
24	0.4	9.6	3.84
9	1.0	9.0	9.0
4	2.0	8.0	16.0
1	5.0	5.0	25.0
0.25	8.0	2.0	16.0
0.11	9.0	1.0	9.0
0	10	0	0

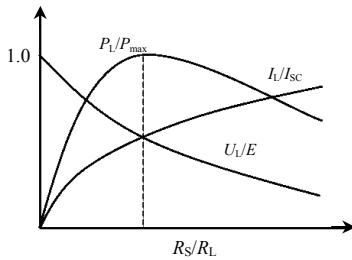


图 3 系统参数变化曲线

Fig. 3 Curve of system parameters variety

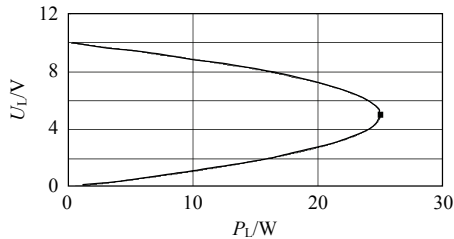


图 4 功率-电压曲线

Fig. 4 Curve of power-voltage

可以看到，由于电源内阻抗的存在，当负载试图通过增加电流获得更大功率时，负载电压要下降。当电压的下降对负载功率的影响大于电流的增加时，负载就不能获得更大的功率。如果负载要求的功率超过了电源的最大功率，并试图通过增加电流来获得更大的功率，就会发生电压崩溃现象。一般认为，在交流系统中，电压控制和无功功率有密切的关系。虽然这个简单直流系统例中没有无功功率，却同样具有交流系统电压失稳的主要特征，表明无功功率不是电压失稳的唯一原因。

2.2 简单纯电阻电路电压稳定性的数学描述

本文给出了新的电压稳定的数学描述。对于图 5 所示的简单直流电路，假设负载在用户或某些自动调节装置的作用下，其最终稳态功率维持不变，可用式(10)的电导一阶模型^[15]表示

$$T_G \dot{G}_L = P_0 - V^2 G_L \quad (10)$$

式中 T_G 为电导的恢复时间常数。当 T_G 接近于零时，负载趋向于恒定功率；当 T_G 接近于无穷大时，负

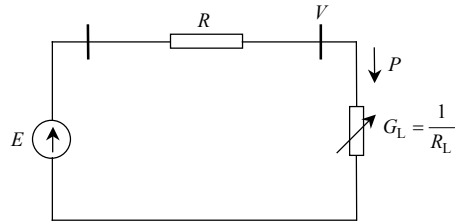


图 5 简单直流电路

Fig. 5 Circuit of simple DC

载趋向于恒定电阻。

由图 5 可以得到电流的平衡方程为

$$0 = VG_L - \frac{E - V}{R} \quad (11)$$

由式(10)(11)组成的微分-代数方程组的小扰动稳定性可用特征分析方法确定。将式(10)(11)在平衡点附近线性化可得

$$\begin{cases} T_G \Delta \dot{G}_L = -2V_0 G_{L0} \Delta V - V_0^2 \Delta G_L \\ 0 = G_{L0} \Delta V + V_0 \Delta G_L + \frac{1}{R} \Delta V \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可以得到特征方程

$$T_G \Delta \dot{G}_L = \frac{V_0^2 (R G_{L0} - 1)}{R G_{L0} + 1} \Delta G_L \quad (13)$$

由式(13)可知：当 $R G_{L0} - 1 < 0$ ，或 $R_{L0} > R$ 时，系统稳定；当 $R G_{L0} - 1 > 0$ ，或 $R_{L0} < R$ 时，系统不稳定。

由图 6 的 $P-V$ 曲线可知，当 $R G_{L0} - 1 > 0$ 或 $R_{L0} > R$ 时，系统处于高电压、小电流状态，对应 $P-V$ 曲线的上半部，是稳定的；当 $R G_{L0} - 1 < 0$ 或 $R_{L0} < R$ 时，对应低电压、大电流状态，处于 $P-V$ 曲线的下半部，是不稳定的。

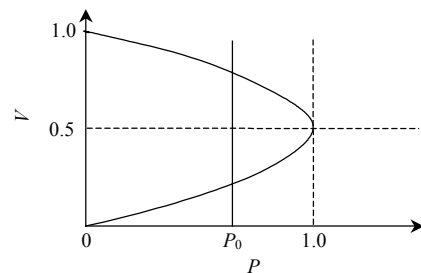


图 6 系统的功率-电压特性

Fig. 6 Characteristics of power-voltage of power system

图 7 为负载电压、电流和功率对负荷需求量的函数关系。由图 6 和 7 可见，在 $P-V$ 曲线上半部的一个平衡点处，引起 G_L 减小(R_L 变大)的扰动，会导致负载所吸收的功率减小，通过调节使 G_L 变大(R_L 减小)回到初值；同样，引起 G_L 变大(R_L 减小)的扰动，导致负载所吸收的功率增加，通过调节使 G_L 减小(R_L 变大)回到初值。同样，在 $P-V$ 曲线下半

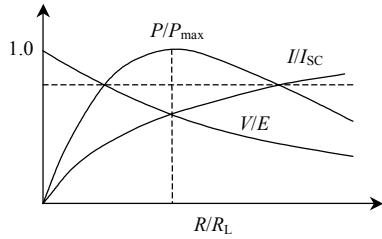


图 7 负载电压、电流和功率对负荷需求量的函数关系
Fig. 7 The relation of load voltage, current and power vs load demand

部的一个平衡点处，引起 G_L 减小 (R_L 变大) 的扰动，导致负载所吸收的功率增加，通过调节会使 G_L 进一步减小 (R_L 变大)，进而沿着 $P-V$ 曲线回到上半部平衡点；引起 G_L 变大 (R_L 减小) 的扰动会导致负载所吸收的功率减小，通过调节会使 G_L 进一步变大 (R_L 减小)，进而沿着 $P-V$ 曲线趋近于零点，这就是电压崩溃的过程。

3 交流电路的电压稳定性

在以电抗占主导的高压交流电力系统中，电压控制和无功功率之间有着十分密切的联系。简单交流电路(假设负荷为一个阻抗)如图 8 所示。

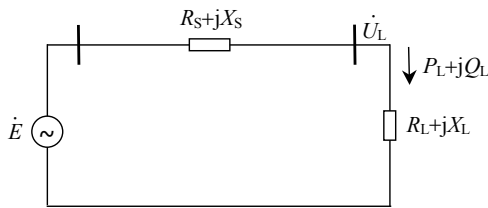


图 8 简单交流电路模型
Fig. 8 Circuit of simple AC model

由图 8 可以得到

$$\begin{cases} I_L = \frac{E}{(R_S + R_L) + j(X_S + X_L)} \\ P_L = \frac{R_L E^2}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \\ Q_L = \frac{X_L E^2}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2} \\ U_L = \frac{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}}{\sqrt{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2}} E \end{cases} \quad (14)$$

假设 R_L 、 X_L 可以任意变化：

1) 当 $R_L=R_S$ 、 $X_L=-X_S$ 时，达到负荷所消耗的最大有功功率 $P_{Lmax}=E^2/(4R_S)$ ，对应的临界电压为 $U_{Lcr}= E\sqrt{R_S^2 + X_S^2} / (2R_S)$ 。此时，从电压源看进去的为纯电阻负荷，这时的电源不会产生任何无功功率。

2) 当 $R_L=-R_S$ 、 $X_L=X_S$ 时，达到负荷所消耗的最大无功功率 $Q_{Lmax}=E^2/(4X_S)$ ，对应的临界电压为 $U_{Lcr} = E\sqrt{R_S^2 + X_S^2} / (2X_S)$ 。此时从电压源看进去的为纯电抗负荷，电源并不会产生任何有功功率。

在交流电力系统中，无功功率使问题变得更复杂。传输有功功率是电力系统的主要功能，而无功功率的传输和消耗也是实际电力系统中不可缺少的一部分。受端系统无功功率的变化会影响最大受电有功功率，也可能引发电压不稳定问题，但无功功率肯定不是电压问题的唯一根源。

由 $R_L=R_S$ 、 $X_L=-X_S$ 、 $P_{Lmax}=E^2/(4R_S)$ 可知，对于交流系统只有在负荷侧的容抗完全补偿了系统的感抗时，才能达到最大有功功率。对于高压交流输电系统， $X_S \gg R_S$ ，正常状态下，负荷无功补偿不可能完全补偿 X_S 。假设无功补偿完全补偿了 X_S ，则由 $U_{Lcr} = E\sqrt{R_S^2 + X_S^2} / (2X_S)$ 可知，只要 $X_S > \sqrt{3}R_S$ ，则 $U_{Lcr} > E$ 。

由于高压交流输电系统 $X_S \gg R_S$ ，正常运行时，受运行电压的限制，不可能为提高最大受电功率而投入大量的无功补偿。在系统故障或负荷加重的情况下，投入无功补偿可以有效提高电压水平和受电能力，因此系统需要动态无功储备。基于以上分析，本文认为电压稳定性问题不仅与无功功率有关，且与有功功率有关。

4 暂态电压失稳机理

4.1 输电网络的输电能力限制

在一个运行接近其电压稳定极限的电力系统中，有功或无功负荷的增加、失去发电机或并联补偿、送端电压下降或输电线故障等都可能造成暂态电压失稳。在以往的暂态电压失稳的机理解释上，大部分研究人员都侧重于系统负荷及负荷侧的系统元件特性，较少涉及系统发电机侧和系统网络的状况，割裂了电力系统的整体性，甚至不能肯定负荷节点电压的恶化是否与发电机功角趋于失稳有关，使某些解释难以说明暂态电压稳定和暂态功角稳定的关系。另一个分歧是如何理解以感应电动机为代表的负荷稳定性和暂态电压稳定性的关系。目前 CIGRE 的定义将负荷稳定等同于电压稳定，然而从经验和概念上来说，负荷稳定和电压稳定是 2 个不同的概念，如果失稳的感应电动机容量较小，则只能引起电压的轻微跌落，甚至仍能保持正常的电压水平。通过对暂态电压失稳现象的本质进行研

究, 本文认为暂态电压失稳是系统性的失稳, 暂态电压稳定主要与输电网络输电极限、负荷动态特性以及受端系统电压支撑 3 个方面相关^[16]。

电力系统稳定运行的前提是必须存在一个平衡点, 且最重要的一类暂态电压不稳定场景正是对应于系统参数变化导致平衡点不再存在的情况。在实际运行中, 暂态电压的失稳往往出现在运行超过最大负荷功率的情况时, 如在重载的输电线上出现一个大扰动(如断线), 这种大扰动使网络特性急剧变动, 扰动后比扰动前输送的最大功率减少, 达不到负荷的功率需求, 这时无论采用何种负荷模型, 都会发生暂态电压失稳现象。

此类问题通常可以作为静态问题来分析, 主要研究手段是潮流仿真, 其本质都是以电网的极限输送能力作为电压崩溃的临界点。在大多数的论证或工业实践中, 常用电压与有功功率的关系曲线, 即用 $P-V$ 曲线来判断系统的电压稳定性, 如图 9 所示。 $P-V$ 曲线通过建立 P (传输断面传送的功率)和 V (关键节点电压)之间的关系, 从而指示传输断面功率水平导致整个系统临近电压崩溃的程度。

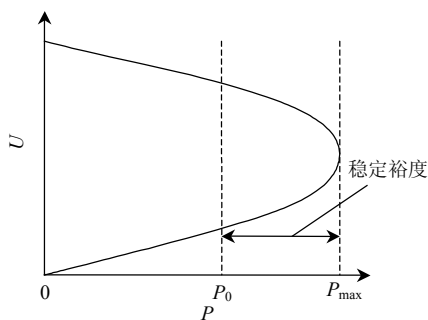


图 9 有输电能力限制的 $P-V$ 曲线

Fig. 9 $P-V$ curve with real power transmission limitation

需要注意的是, 在大扰动情况下, 网络特性急剧变动, 扰动后网络的特性(如 $P-V$ 曲线)不再同未改变的负荷相应特性相交, 失去了系统稳定运行的平衡点, 直接导致系统暂态电压失稳, 系统中所有节点将在同一功率水平下达到电压崩溃点, 而与特定节点的选择无关。

4.2 负荷动态特性

通常, 暂态的负荷特性比稳态的负荷特性对电压变化更敏感。各种负荷成分和控制装置的动态行为都是想恢复负荷功率, 至少是一定程度的恢复, 影响暂态电压稳定性的负荷主要是感应电动机。

随着负荷母线电压的下降, 负荷从系统吸收的无功功率会恶化系统的区域无功平衡, 形成电压下降的正反馈机制。如果负荷节点的电压跌落严重(如

在较慢切除短路故障期间), 感应电动机吸收的无功功率会上升, 可能导致电压崩溃, 除非保护装置或交流接触器将感应电动机跳开(这种情况也称为感应电动机失稳)。故障切除后, 如果某些感应电动机不能再加速, 则这些电动机将趋于堵转, 并导致相邻的电动机也发生堵转。如果感应电动机的失稳只导致个别节点的电压跌落, 则不能把感应电动机稳定性视为暂态电压稳定性, 此时称为感应电动机失稳; 如果感应电动机的失稳最终导致系统性的电压严重跌落/崩溃, 这时可以认为是系统暂态电压失稳。在暂态电压稳定仿真研究中, 感应电动机必须表示为动态负荷模型。

4.3 受端系统电压支撑不足

1) 发电机引起的暂态电压失稳。发生电压失稳事故时电力系统一般处于高负荷水平, 且从远方电源送入大量功率, 并伴随突然出现的大扰动。受端系统的发电机在大扰动发生后往往会处于过励磁与过载状态, 当由于励磁绕组热容量限制, 机组的过励磁能力到达设定运行时间时, 过励磁限制器会将励磁电流减少到额定值, 导致网络中无功大量缺额, 使远方发电机必须提供所需的无功功率。而由远方发电机向负荷区域提供无功是低效率甚至是无效果的, 致使发电和输电系统不能够再支撑无功需求和系统无功损耗, 随即系统电压迅速下降, 导致暂态电压失稳。

2) 并联电容器、SVC 引起的暂态电压失稳。大量安装并联电容器容易造成暂态电压失稳, 其原因是并联电容器提供的无功支持随着电压的平方变化, 因此在电压下降的同时, 其提供的无功支持会大大下降, 容易导致暂态电压失稳。

SVC 的动态调节有利于提高系统的暂态电压稳定性, 但一旦达到其最大输出电纳或者最大输出电流时, SVC 的无功输出与母线电压为平方关系, 其效果相当于并联电容器, 此时 SVC 丧失了无功调节的能力, 其提供的无功支持能力大大下降, 同样容易导致暂态电压失稳。

3) HVDC 引起的暂态电压失稳。HVDC 在远距离、大容量输电方面具有独特优势。然而由于直流换流器要消耗大量的无功功率(为直流有功功率的 50%~60%), 使大干扰后交直流系统的暂态电压稳定性面临严峻的考验, 尤其是与直流系统相连的弱交流系统的暂态电压稳定性。

HVDC 系统的严重故障(直流双极闭锁)会导致

潮流大量转移。一旦电压降低,受端系统中感应电动机负荷的无功需求会大量增加,同时并联电容器提供的无功补偿开始减少,全网电压会进一步恶化导致暂态电压失稳。直流功率在交流系统故障切除后的快速恢复有助于缓解交流系统的功率不平衡,但过快的功率恢复却可能造成后继的换相失败,导致交流系统暂态电压失稳。对于直流多馈入电力系统,这一特点更加明显。

5 结论

本文在分析了电压稳定定义和数学模型后,给出了物理意义明确的电压稳定和电压崩溃的定义。本文还对纯电阻电路和交流电路的电压稳定性机理进行了研究,说明了电力系统电压稳定性的机理,并从输电网络输电极限、负荷动态特性以及受端系统电压支撑3个方面对电力系统电压稳定进行机理解释。电压稳定性机理对于电力系统电压稳定性的分析和控制具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 孙寿广. 受端电网: 电力系统规划建设及运行的核心[J]. 中国电力, 2003(7): 34-37.
Sun Shouguang. Receiving-end grid: The core of programming, construction and operation in power system[J]. China Electric Power, 2003(7): 34-37(in Chinese).
- [3] 夏向阳, 张一斌, 蔡灏. 电力受端系统的稳定问题及其对策分析[J]. 继电器, 2005, 33(17): 74-78.
Xia Xiangyang, Zhang Yibin, Cai Hao. Problems and countermeasures of power receiver system stability[J]. Relay, 2005, 33(17): 74-78(in Chinese).
- [4] 武寒, 祝瑞金. 华东大受端电网电压稳定性研究之我见[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 1-5.
Wu Han, Zhu Ruijin. Voltage stability of large receiving-end grid of East China[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 1-5(in Chinese).
- [5] 黄志龙. 华东大受端电网安全稳定分析研究思路[J]. 华东电力, 2007, 35(5): 40-43.
Huang Zhilong. Study of security and stability of large receiving-end grids of East China[J]. East China Electric Power, 2007, 35(5): 40-43(in Chinese).
- [6] 郭剑波, 姚国灿, 徐征雄, 等. 我国未来大区电网互联可能出现或应该注意的若干技术问题[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 63-67.
Guo Jianbo, Yao Guocan, Xu Zhengxiong, et al. Some technical problems concerned with the future Chinese interconnected power systems[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 63-67(in Chinese).
- [7] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术, 2003, 27(9): T1.
Zhou Xiaoxin, Zheng Jianchao, Shen Guorong, et al. Draw lesson from large scope blackout of interconnected North American Power Grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): T1(in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 何大愚. 对于美国西部电力系统1996年7月2日大停电事故的初步认识[J]. 电网技术, 1996, 20(9): 35-39.
He Dayu. A preliminary understanding of WSCC disturbance and separation on July 2, 1996 in the United States[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 35-39(in Chinese).
- [10] 卢卫星, 舒印彪, 史连军. 美国西部电力系统1996年8月10日大停电事故[J]. 电网技术, 1996, 20(9): 40-42.
Lu Weixing, Shu Yinbiao, Shi Lianjun. WSCC disturbance on August 10, 1996 in the United States[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 40-42(in Chinese).
- [11] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-6.
Tang Baosheng. Blackout in South of London and its lessons [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-6(in Chinese).
- [12] 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): 60-62.
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): 60-62(in Chinese).
- [13] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [14] Cutsem T V, Vournas C. Voltage stability of electric power systems [M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998: 176-177.
- [15] Overbye T J. Effects of load modelling on analysis of power system voltage stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1994, 16(5): 329-338.
- [16] Tang Y, Ma S Y, Zhong W Z. Mechanism research of short-term large-disturbance voltage stability[C]. 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006.



汤涌

收稿日期: 2009-10-26.

作者简介:

汤涌(1959—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析;

仲悟之(1979—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真与分析, E-mail: zhongwz@epri.sgcc.com.cn;

孙华东(1975—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制;

林伟芳(1983—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制;

易俊(1980—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制;

张鑫(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制。

(责任编辑 王晔)