

电力系统电压稳定性及其研究现状(二)

苏永春¹,程时杰¹,文劲宇¹,刘 邕²

(1.华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074;

2.小浪底建管局水力发电厂,河南 洛阳 471000)

摘要:在第一部分介绍电压稳定定义、分类及分析方法的基础上,针对负荷对电压稳定研究的重要作用,介绍了常用的静态和动态负荷模型,并分析了负荷特性对电压稳定的影响。给出了电力系统电压失稳的几种典型场景,如中长期电压失稳、电压崩溃、电压升高失稳等。可通过无功补偿、变压器分接头紧急控制、发电计划重新安排、切负荷等措施进行电压稳定控制。指出需进一步研究的问题:电压稳定机理;发电机对电压稳定的作用;考虑电能质量要求的电压稳定性;电压稳定与功角稳定的关系;电压稳定性的定量指标;考虑负荷的静态和动态模型;直流输电对电压稳定的影响。

关键词:电力系统;电压稳定;负荷;失稳;措施

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)07-0097-04

1 负荷建模及其对电压稳定的影响

1.1 静态负荷模型

在电压稳定研究中常采用的静态负荷模型有指数模型^[1]和 ZIP 模型^[2],分别如式(1)和式(2)所示。

$$P=P_0(U/U_0)^\alpha, Q=Q_0(U/U_0)^\beta \quad (1)$$

$$P_s=(p_1+p_2U+p_3U^2)P_0 \quad (2)$$

$$Q_s=(q_1+q_2U+q_3U^2)Q_0$$

1.2 动态负荷模型

电压稳定研究中主要有 3 类动态负荷模型。

a. 无功功率平衡模型。该模型以确定负荷节点的某些变量与无功功率的不平衡关系为目的建立,具有如式(3)所示的形式^[3]。

$$\frac{dU}{dt}=\frac{Q_d-Q_s(U)}{K(U)} \quad (3)$$

b. 功率恢复模型。负荷扰动后,功率恢复对电压稳定有重要影响,负荷的功率恢复特性是由负荷有功功率平衡和有载调压分接头(OLTC)电压调节作用共同决定。动态模型具有式(4)所示的形式^[4]。

$$T_p\dot{P}_d+P_d=P_s(U)+k_p(U)\dot{U} \quad (4)$$

$$T_q\dot{Q}_d+Q_d=Q_s(U)+k_q(U)\dot{U}$$

该模型属于输入/输出模型,其有功功率和无功功率具有类似的恢复特性。功率恢复模型只注重端口特性,不利于对电压稳定问题的定性讨论和形成判断动态过程中电压稳定性的判据。文献[5]采用的负荷集总外部模型(AER)与此模型类似。

c. 机理式模型。这是一类考虑系统的平衡被破坏以后,调整其等效导纳,建立反映导纳变化与功率平衡关系的模型。机理式模型分为 2 大类,一类只使用描述电导 G 变化特性的微分方程,另一类则

是同时使用描述电导 G 和电纳 B 变化特性的微分方程,该类模型由式(5)给出^[6]。

$$\frac{dG}{dt}=\frac{1}{T_G}(P_0-U_L^2G), \quad \frac{dB}{dt}=\frac{1}{T_B}(Q_0-U_L^2B) \quad (5)$$

使用这类机理式负荷模型的最大优点是更有利于对电压稳定问题的定性理解。

1.3 负荷特性对电压稳定的影响

式(1)(2)所表示的负荷静态特性本质上是一致的,可以看出,模型中分别含有恒功率负荷、恒电流负荷及恒阻抗负荷分量。恒功率负荷不利于电压稳定,而恒电流负荷与恒阻抗负荷属于电压敏感负荷,从网络中吸收的功率随电压下降而减小,因而这类负荷的存在有利于增强系统的电压稳定性,属于这种负荷的有加热器负荷和传统的照明负荷等。

负荷动态特性对电压稳定性主要有 2 点影响。

a. 从系统吸收的无功功率随负荷母线电压下降而增加的负荷特性,在含大量感应电动机负荷时尤其明显,感应电动机具有如图 1 所示的工作特性。当扰动引起母线电压降低时,电动机转速因电磁转矩的减小而降低,使吸收的无功电流显著增加,当位于馈线末端的电动机停转时会从网络中吸取大量无功电流,导致母线电压的进一步下降,甚至引起电动机的级联停转而发生电压失稳,这种负荷特性对电压稳定非常不利。

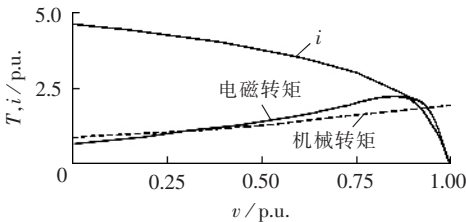


图 1 感应电动机特性

Fig.1 Characteristics of the induced motor

b. 动态负荷的有功功率恢复特性^[7],即在电压

下降以后,各类负荷的有功功率和无功功率会以或快或慢的速度恢复到一定的水平。这种负荷特性也不利于电压稳定,当系统无功不足时,该特性可能引起中长期电压失稳。

2 电压失稳场景分析

在此给出了电力系统电压失稳的几种典型场景^[8],属于电力系统电压稳定问题的定性分析范畴,这种分析有助于对电压失稳机理的理解。

2.1 电压失稳的分类

根据引起电力系统电压失稳主要原因的不同,把电压失稳分为 2 种类型^[9]。

a. 电压调控能力丧失型失稳。因系统无功储备(包括发电机、同步调相机和 SVC 等动态无功补偿装置)耗尽,失去对电压的控制能力,导致电压失稳。

b. 阻塞型电压失稳。线路的无功损耗 I^2X 、变压器分接头调节限制和因电压降低导致电容器无功出力下降,使需要无功支撑的区域得不到无功供应,从而造成的电压稳定问题称为阻塞型电压失稳,发生这种电压失稳时,系统无功储备可能还未耗尽。

2.2 中长期电压失稳

普遍认为,中长期电压失稳的机理与负荷恢复特性、OLTC、发电机励磁电流的限制有关。扰动发生后,发电机励磁系统的调压作用及负荷需求因电压下降而减少,都有助于使系统暂时保持电压稳定。但 OLTC 的连续调节会使负荷电压和所吸收功率得到恢复,造成 OLTC 原方电压下降和电流上升,导致发电机无功功率越限。发电机无功功率越限的连锁反应使负荷电压急剧下降形成电压失稳。

2.3 电压崩溃的场景

在一个大型电力系统中,当某个负荷节点失去电压稳定后,由该节点从电网吸收的无功功率和电流的急剧上升必然导致整个电网电压水平的下降,其中相邻负荷节点的电压下降尤为严重。在极端情况下导致这些节点也发生电压崩溃,新的电压失稳负荷又把影响扩大到更大的范围,结果往往会造成又一批负荷失去电压稳定,使邻近的发电机因有功功率无法送出而加速,在系统中引起剧烈的功角摇摆,最后由于保护的相继动作而引起系统崩溃。这是电压失稳导致系统崩溃的基本过程。

2.4 电压升高失稳

大多数电压失稳的表现形式为母线电压的持续下降,但过电压导致失稳的情况也是存在的,文献^[10]描述了电压升高失稳的实例。引起这种类型电压失稳的原因包括电力网络的容性效应、发电机的最小励磁限制、同步调相机的进相运行、变压器分接头的调节限制及较低的负荷水平等。

3 电压稳定控制

3.1 无功补偿

常用的电力系统无功补偿包括并联电容器组、

SVC 及 STATCOM 等。

3.1.1 机械投切的并联电容器

文献^[11]研究认为,电容器的过度使用在特定扰动下会恶化无功功率的不平衡,是电压崩溃的一个诱因。由于并联电容器的无功出力与端电压的平方成正比,当扰动后电压下降很大时,会导致电容器无功出力大幅降低,不利于电压恢复。故并联投切电容器组在紧急情况下补偿无功的作用有限。

3.1.2 SVC 和 STATCOM

SVC 和 STATCOM 是目前电压稳定研究中采用最多的动态无功补偿设备,大量文献^[12-14]的研究表明这些设备的使用可以有效提高系统的电压稳定性,其典型结构分别如图 2(a)(b)所示^[12]。

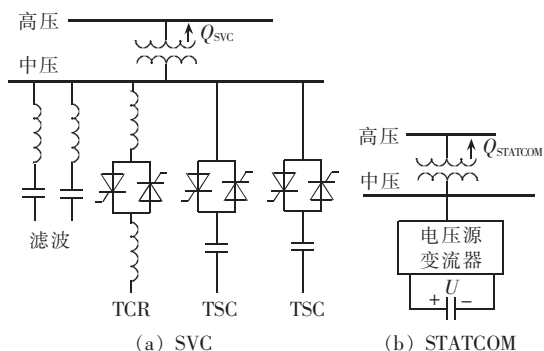


图 2 SVC 和 STATCOM 的典型结构

Fig.2 Typical structure of SVC and STATCOM

SVC 结构图中滤波电路用来滤掉高次谐波,对于基波呈容性。SVC 可以设计成对称或不对称方式运行(指容性和感性调节容量),而 STATCOM 总以对称方式运行。

SVC 和 STATCOM 的 $U-I$ 工作特性比较见图 3^[15],其主要区别在于超过其控制范围后的特性,这时的 SVC 和 STATCOM 分别相当于一个并联电容和一个恒流源。

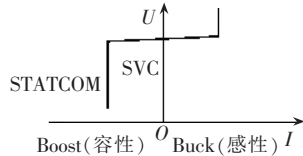


图 3 SVC 和 STATCOM 的 $U-I$ 工作特性

Fig.3 $U-I$ characteristics of SVC and STATCOM

3.2 变压器分接头的紧急控制

OLTC 的主要作用是在正常运行时调节负荷母线的电压,使其在允许范围内。分接头动作一般不利于电压稳定,在系统紧急状况下,OLTC 和发电机过励限制器(OEL)等慢动态装置的相互作用可能引起电压失稳,这种情况在负载为电压敏感负荷时尤为明显。但在有些情况下,分接头动作有利于增加电压稳定性,如:负荷为恒功率负荷或感应电动机负荷以及存在感应风力发电机的情况下,因为对于恒功率负荷,配电网电压升高会降低网络中的有功功率和无功功率损耗,而对于感应电动机和感应发电机,其无功功率-电压特性为负的斜坡特性,即电压升高时,吸收的无功功率会减小。

分接头的紧急控制措施包括分接头调节闭锁和分接头逆调节,即把控制母线由配电侧转为输电侧。文献[16]研究了在系统紧急运行状况下,OLTC 分别采用正常调节、闭锁调节和逆调节的效果,指出分接头的逆调节在紧急情况下可以暂时停止或延缓电压下降趋向崩溃。

3.3 发电计划重新安排

该控制措施属于短期运行计划的范围,优点是控制可以在现有设备的基础上进行,无需增加新设备。文献[17]应用模态分析方法计算出发电机和母线的模式参与因子,根据参与因子提供的方向解决最优潮流问题,基于有功、无功在正常运行时的重新分配,使无功储备及电压稳定裕度都得到提高。

3.4 切负荷

当其他控制措施都无法阻止系统趋向电压失稳时,切负荷是制止电压崩溃的最后手段,它是保证电力系统继续安全运行的最后防线。Echavarren 研究了切负荷母线的最优选择问题^[18];Balanathan 采用非线性最小二乘法,通过在线估计动态负荷模型参数,研究了负荷的最小切量计算问题^[19];Ladhani 探讨了负荷极限切除时间的确定问题^[20]。

4 有待进一步研究的问题

a. 电压稳定机理的深入研究。虽然关于电压稳定研究已取得许多重要成果,但与成熟的功角稳定相比,人们对电压稳定的本质仍缺乏全面认识,研究方法和理论还不够完善,对于同样的电压稳定问题,采用的系统模型不同,所得稳定性准则差别很大,因此,需要对电压崩溃机理深入研究,统一认识。

b. 深入探索发电机对电压稳定的作用。从根本上来讲,电力系统的电压最终是由发电机支撑,并联电容、SVC 等无功补偿装置可视为与电压有关的无功负荷。因而,电力系统的电压稳定性和发电机的电压调控能力关系应该十分密切,如在水电占有较大比例的系统中,丰水期由于大量火电机组停运,系统缺乏有效的无功电源,在负荷中心运行电压偏低,迫使负荷中心的火电厂满无功出力运行,最终导致系统动态无功储备缺乏,进一步恶化了电厂的动态电压支撑能力。这种情况下易于发生电压失稳问题。许多文献涉及这方面的内容^[3, 21-22],但发电机在电压稳定中的作用值得更深入研究。

c. 考虑电能质量要求的电压稳定性。在考虑电能质量时,电压稳定性的考虑不仅要计及电压跌落的幅值还要计及电压跌落的持续时间。这也会涉及电压失稳的判断标准问题。图 4 给出了 WSCC (美国西部系统协调委员会)制定的电压动态行为准则^[23],该准则对电压降落的规定为:在电压降落低于初始值 20% 的情况下持续时间不允许超过 20 个周期。该准则在故障清除 2 个周期后实施。由于

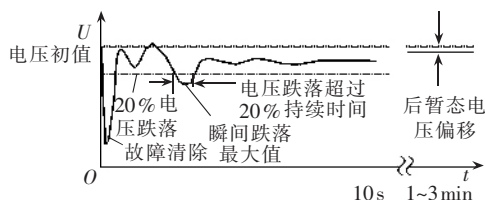


图 4 WSCC 电压行为准则

Fig.4 WSCC voltage behavior rules

用户对供电质量要求日趋严格,如何在保持电力系统电压稳定的前提下,同时满足这些准则,会对电力系统电压稳定性研究提出更高要求。

d. 电压稳定与功角稳定的关系。电能经传输线送往负荷时,如果负荷区只含有负荷,而不含发电机,则负荷区的稳定问题为纯电压稳定问题,不存在功角稳定问题,而单机对无穷大系统则属于纯功角稳定问题。对多数电力系统而言,电源区中存在负荷,负荷区中也存在发电机,因而,系统的稳定性问题既可能有电压稳定问题,又可能有功角稳定问题,尤其是在大干扰过程中,电压失稳必定与功角稳定紧密相连。Vournas 等人在这方面已进行了初步探讨^[24-25],但两者关系还有待大量深入细致的研究。

e. 电压稳定性的定量指标。特别是大干扰电压稳定性的定量指标问题,已有的成果较少。现有的指标一般属于静态指标,通过灵敏度、奇异值等方法得出。在系统遭受到大干扰情况下研究系统的实用安全指标具有更重要的意义。

f. 考虑负荷的静态和动态模型。现在电压稳定研究中一般会同时考虑负荷静态和动态模型,如何合理地设置它们的比例和参数使之正确反映实际情况,一直都是电压稳定研究的难点。

g. 直流输电对电压稳定的影响。随着我国直流输电线路增加,其对电压稳定的影响值得关注。

5 结语

电力系统电压稳定性一直是近年来的热点研究问题之一,经过众多研究人员长时间的努力,取得了大量的研究成果。本文从电力系统电压稳定的定义和分类开始,对其研究内容、研究方法、失稳情况及控制手段等方面的研究现状作出了总结与评述,所参阅的文献也力图反映出该领域的研究概貌和最新动向。同时,随着电力系统的发展及新技术的不断涌现,这一领域仍存在大量有待进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] HAJAGOS L M, DANAI B. Laboratory measurements and models of modem loads and their effect on voltage stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 584-592.
- [2] RANADE S J, ELLIS A, MECHEMBIER J. The development of power system load models from measurements[C]//Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2001: 201-206.
- [3] 包黎昕. 电压稳定动态分析及预防电压崩溃的措施[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.

- BAO Li-xin. Dynamic analysis of voltage stability and countermeasures of voltage collapse[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2000.
- [4] HILL D J. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(1):166-176.
- [5] WEN J Y, WU Q H, TURNER D R, et al. Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004,19(2):1115-1122.
- [6] PAL M K. Voltage stability:analysis needs,modelling requirement, and modelling adequacy[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1993,140(4):279-286.
- [7] POURBEIK P, KOESSLER R J, RAY B. Tools and techniques for analyzing voltage stability related reliability challenges[C]// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2003:417-421.
- [8] CUTSEM T V. Voltage instability:phenomenon, countermeasures and analysis methods[C]// Proceedings of IEEE. [S.l.]:IEEE, 2000:208-227.
- [9] CRAIG A A, TAPAN S K. Determination of power system coherent bus groups by novel sensitivity-based method for voltage stability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3):1157-1164.
- [10] CUTSEM T V, MAILHOT R. Validation of a fast voltage stability analysis method on the hydro-quebec system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997,12(1):282-292.
- [11] HUANG G, ZHANG H. Dynamic voltage stability reserve studies for deregulated environment[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]:IEEE, 2001:301-306.
- [12] NOROOZIAN M, TAYLOR C W. Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application[C]// Proceedings of IEEE PES Transm and Distrib Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2003:1143-1150.
- [13] HAQUE M H. Determination of steady state voltage stability limit of a power system in the presence of SVC[C]// IEEE Power Tech Proceedings. [S.l.]:IEEE, 2001:10-13.
- [14] NATESAN R, RADMAN G. Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on voltage stability[C]// Proceedings of the Thirty-sixth Southeastern Symposium on System Theory. [S.l.]:IEEE, 2004:546-550.
- [15] DIAZ J A, TAYLOR C W. Understanding and solving short-term voltage stability problems[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]:IEEE, 2002:745-752.
- [16] VOURNAS C, KARYSTIANOS M. Load tap changers in emergency and preventive voltage stability control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1):492-498.
- [17] AFFONSO C M, SILVA L C, LIMA F G, et al. MW and Mvar management on supply and demand side for meeting voltage stability margin criteria[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3):1538-1545.
- [18] ECHAVARREN F M, LOBATO E, ROUCO L, et al. A load shedding algorithm for improvement of load margin to voltage collapse[C]// Proceedings of IEEE Power Tech Conference. Bologna, Italy:IEEE, 2003:23-26.
- [19] BALANATHAN R, PAHALAWATHTHA N C, ANNAKAGE U D. Undervoltage load shedding to avoid voltage instability[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2):175-181.
- [20] LADHANI S S, ROSEHART W. Under voltage load shedding for voltage stability:overview of concepts and principles[C]// Proceedings of IEEE PES General Meeting. [S.l.]:IEEE, 2004:1597-1602.
- [21] 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.
- [22] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York:McGraw-Hill, 1994.
- [23] KOLLURI S, KUMAR A, TINNIUM K, et al. Innovative approach for solving dynamic voltage stability problem on the energy system[C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]:IEEE, 2002:988-993.
- [24] VOURNAS C D, SAUER P W, PAI M A. Relationship's between voltage and angle stability of power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(8):493-500.
- [25] 吴浩. 电力系统电压稳定研究[D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- WU Hao. Researches on voltage stability in power system[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2002.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

苏永春(1973-),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性(E-mail:ychunsu@163.com);

程时杰(1945-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用等;

文劲宇(1970-),男,湖南常德人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用等。

Power system voltage stability and its present investigation(II)

SU Yong-chun¹, CHENG Shi-jie¹, WEN Jin-yu¹, LIU Qi²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Water Power Station of Xiaolangdi Construction and Administration Bureau, Luoyang 471000, China)

Abstract: Based on the definition, classification and analysis methods of voltage stability introduced in the first part, general static and dynamic load models are described in this paper for its significant effect on the voltage stability. The influence of the load characteristic on voltage stability is also analyzed. Several typical scenarios of voltage instability are presented, including the mid- & long-term voltage instabilities, the voltage collapse, the rising voltage instability. Countermeasures are reactive compensation, transformer tap emergency control, generation rescheduling, load shedding, and so on. Issues needing further study are pointed out: the voltage stability mechanism; the effect of generators on voltage stability; the voltage stability considering the power quality demand; the relationship between voltage and angle stabilities; the quantitative index for voltage stability; static and dynamic models considering the load characteristic; the effect of DC transmission on voltage stability, and so on.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50595410).

Key words: power system; voltage stability; load; instability; countermeasures