

# 电力系统电压稳定机理探究

郑琳, 田晨阳

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 在学理解电力系统电压稳定概念的前提下, 牢固掌握电压稳定机理是研究电压稳定的基础环节。从失稳机理的角度来看, 导致电力系统电压失稳的原因包括: 负荷的动态恢复特性, 电力系统受端电压支撑不足, 电力系统送端的供电限制, 以及综合负荷因素。从以上四种角度定义的电压稳定机理进行了综合分析和评价, 并归纳总结了各类定义方式的特点及优缺点。

**关 键 词:** 电力系统; 电压稳定; 机理; 负荷动态特性

**中图分类号:** TM712

**文献标识码:** A

在电力系统研究领域当中, 电压稳定问题是一项十分重要的课题, 因为它直接决定着电力系统能否正常运行<sup>[1]</sup>。研究电力系统电压稳定主要有三个步骤: 第一, 明确理解电压稳定机理; 第二, 根据电压稳定机理来建立可以从本质上反映系统电压崩溃的模型; 第三, 找到分析和控制电力系统电压稳定性的手段与方法<sup>[2]</sup>。其中掌握电压稳定机理是其余两个步骤的关键性基础, 因此本文就目前国内外对于电压稳定机理的研究成果进行系统的归纳和总结, 并指出其相应的优缺点。

## 1 电压稳定的定义

目前对于电压稳定的定义, 不同文献资料中的研究成果不尽相同。但从总体上可以归为两类, 大干扰电压稳定和静态电压稳定<sup>[3]</sup>。其中大干扰电压稳定还包括暂态电压稳定, 动态电压稳定和中长期电压稳定。这类问题主要反映在系统运行过程当中有大扰动介入时, 系统不会发生电压崩溃的能力。而静态电压稳定则指在电力系统运行过程中, 小干扰事件发生并介入电力系统时, 系统电压水平能够保持或者恢复到系统可接受的范围极限内, 不发生电压崩溃的能力<sup>[4]</sup>。然而, 以上定义电压稳定的方法十分宏观, 对于具体定量的研究电力系统电压稳定不利。因此本文引入电力系统电压稳定的最新定义, 电压稳定是指: 当负荷试图通过增加电流来从系统中获得更大的功率时, 系统电压的降低不足以抵消功率增大的趋势, 此时称为电压稳定状态<sup>[5]</sup>。由此电压稳定的概念得到了进一步的具体化, 能更好的为反映电力系统电压稳定本质而服务。

## 2 电压稳定机理的研究现状

关于电力系统电压稳定机理的学术研究成果中, 影响电压稳定的因素大体上可以分为四类: 第一类, 负荷的动态特性; 第二类, 电力系统受端的电压支撑情况; 第三类, 电力系统送端的供电极限; 第四

类,综合因素影响。本文将分别就以上四类影响电压稳定的因素进行归纳总结并加以拓展。

### 2.1 负荷的恢复特性对电压稳定性的影响

负荷动态特性对于电压稳定的影响,目前的学术成果可分为两类:一类观点认为,系统在发生故障时,负荷为了维持它自身的有功功率平衡,会试图改变其自身对外的等效电纳以此来进行功率调节,从而影响了电力系统电压的稳定性<sup>[6]</sup>,然而这种调节自身导纳的方式会因为具体元件的特性而有一定差异。例如,异步电动机常常利用电磁功率的输入与机械功率的输出来进行导纳调节,配电系统中的 OLTC(On Load Tap Changer 有载分接开关)则会在维持其副边电压恒定的前提下,通过自动调节变比来实现导纳的调节。含电力电子元件的负荷,调节自身导纳的情况则更为复杂<sup>[6,7]</sup>。总体上来看,当元件的有功功率平衡被打破以后,若负荷输出的其他形式功率多于输入的电磁功率,那么负荷就会根据自身特点自动选择恰当手段来减小其等效阻抗,从而获得自身所需要的功率<sup>[8]</sup>。但是随着元件恢复功率过程中电流的增加,负荷元件的漏抗上会消耗更多的无功功率,这一部分的无功消耗,可以加剧整个系统的无功欠缺<sup>[9]</sup>。无功功率不足,使得系统电压持续下降,进而产生电压失稳的现象<sup>[10]</sup>。这种观点在用于定量研究负荷特性对电压稳定的影响时意义重大,但理论不够成熟,有待进一步完善。另一类观点认为,电压失稳与系统所带负荷的性质密切相关<sup>[11]</sup>。例如,系统所带负荷为恒阻抗静态负荷时,假定其功率因数为  $\cos\varphi$ ,阻抗为  $Z_L = R_L + jX_L$ ,那么负荷消耗的有功功率如式(1)所示:

$$P_L = R_L I_L^2 = \frac{R_L E^2}{(R_s + R_L)^2 + (X_s + R_L \tan\varphi)^2}, \quad (1)$$

$P_L$  在  $R_L$  变化下的极值计算公式为式(2)所示:

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{E^2(R_s^2 + X_s^2 - R_L^2 - R_L^2 \tan\varphi)}{[(R_s + R_L)^2 + (X_s + R_L \tan\varphi)^2]^2}, \quad (2)$$

由  $P_L$  的单调性可知,当满足  $|Z_L| = |Z_s|$  时,在恒定功率因数的负荷模型下,负荷有功功率最大,由于电压降低时恒阻抗负荷功率会下降,有利于电压稳定<sup>[12]</sup>,那么当系统的功率和电压水平均低于期望值时,系统电压会保持稳定<sup>[13]</sup>。当系统所带的负荷为恒功率负荷模型时,一旦负荷端电压降低,负荷为了保持恒定功率,必然会导致负荷电流的增加,由于输电线路阻抗的存在,使得输电线路的压降进一步增大,从而造成了更低的负荷端电压<sup>[14]</sup>。这也形成了一个电压下降的正反馈机制,最终必然会导致电压崩溃<sup>[15]</sup>。这种观点在计算和理论发展上,都比较成熟。但是,在实际电力系统当中,特别是系统受到扰动的过程当中,实际的负荷很难以恒定功率或恒定功率因数运行<sup>[16]</sup>,因此将该理论算法应用于计算实际电力系统运行状态时会存在一定误差。

### 2.2 电力系统受端电压支撑情况对电压稳定的影响

重负荷的电力系统本身就具备很多薄弱环节,一方面,受端的发电机一直处于过载状态,发电机励磁系统过载,如果这时出现了大干扰事件,负荷为了恢复其有功功率的平衡,试图调节自身电流获得更大的功率<sup>[17]</sup>。但是发电机励磁绕组本身的热容量存在一定限值。过励磁限制器会将励磁电流强制减少到额定值,使得负荷的有功功率无法平衡<sup>[18]</sup>,同时网络中的无功功率大量缺失。这种情况下受端发电机无法提供足够的无功功率来支持系统的正常运行,最终导致电压失稳甚至电压崩溃<sup>[19]</sup>。另一方面由于电力系统的无功功率的大小随着电压的平方而发生变化,如果系统电压下降,则无功功率会以更快的速度减少,因此 HVDC、SVC 以及大量安装并联电容器也是造成暂态电压失稳的重要原因。

### 2.3 电力系统送端供电极限对电压稳定的影响

由于受到线路阻抗、输电距离、电压等级的制定以及送端发电机励磁绕组的热容量限制等一系列因素的影响,送端并不能毫无限制的向受端供电,并且送端对全网电压的调节能力有限,因此在研究电力系统电压稳定特性时,常常将电压崩溃的临界点作为衡量电网输送能力的指标<sup>[20]</sup>。动态负荷有功功率的恢复特性,即在电压下降以后,各类负荷的有功功率和无功功率都会以或快或慢的速度恢复到一定水平,其中发电机、调相机侧励磁系统、负荷侧同步电动机、电动机静止无功补偿器都属于反应快速的元件,他们在暂态电压失稳中,起到的作用十分巨大。因此为了提高在工程实践中对于电压稳定性评估的

精确程度,常常使用瞬时有功功率随暂态电压变化的关系曲线来研究电压稳定性问题<sup>[20]</sup>。系统向负荷提供的功率随着电流的增加而增加时,系统负荷元件可以保持自身功率平衡,系统电压处于稳定状态,反之系统电压不稳定。

## 2.4 综合因素对电压稳定的影响

从单一类因素去考虑电力系统电压稳定性的研究大多数意义明确,但是由于考虑因素不够全面,因此这种理论成果与工程实际情况差距比较大,所以从以上三类因素的综合作用来解释电压稳定的机理会更加完善。当有干扰事件介入电力系统后,发电机励磁系统会启动强励磁作用,系统无功缺失,电压下降,负荷对于功率的需求也相应的减少<sup>[21]</sup>。此时系统能在短时间内保持电压稳定,但是在系统负荷的中心电压会维持在较高的水平,若负荷中心电压降低,则该现象会迅速反映到配电系统中,那么在2~4分钟内 OLTC 会起到连续调节的作用,使负荷的功率和电压恢复到故障前水平,同时使 OLTC 原方电压下降,并且 OLTC 每次的分接头调整都会导致超高压线路负荷的增加<sup>[22]</sup>。由此可得,发电机需要强制增大无功功率的输出来满足系统电流的上升趋势。但这种无功功率的输出不是没有限制的,一旦造成发电机无功功率越限的连锁反应,就会使得系统的电压急剧下降,这个过程最终必然会导致发电机组失步,最后对受电系统停电<sup>[23]</sup>。虽然从综合因素角度来分析电力系统电压稳定机理比较全面,但是影响电压稳定的因素实质上是多种因素的有机叠加,该方法只停留在理性阶段,在工程实践的应用中,很难形成准确的判据。

## 3 结 论

研究人员从不同的角度来研究了电压稳定机理,这些理论研究取得了很多成果,但是也确实存在着亟待解决的问题,本文对迄今的研究成果进行了系统的总结。随着新的电压稳定理论模型以及研究方法的引入,人们对电压稳定机理的认识将走向成熟。电压稳定问题在电力系统的研究领域当中虽然是一个基础性的课题,电力系统的结构也千差万别,进而一系列综合因素的有机叠加必将造成电力系统电压的失稳。在做到考虑全面的前提下,还应当注重数学工具的恰当引入,使得完善的理论可以有效的与实际结合。

## 参 考 文 献

- [1] 刘迎迎,孙毅,李昕. 电力系统电压稳定分析方法综述[J]. 东北电力大学学报,2013,33(5):43-46.
- [2] 汤勇,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):23-26.
- [3] 殷华,丁坚勇. 电压稳定问题综述[J]. 东北电力技术,2003,22(6):8-12.
- [4] 李晨霞,康积涛. 基于动态负荷模型的电压稳定性研究[J]. 电气开关,2009,20(6):26-28.
- [5] 郑琳. 电力系统电压稳定性分析[J]. 黑龙江科技信息,2014,34(27):81-82.
- [6] 段献忠. 电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J]. 电力系统自动化,1999,18(10):2-6.
- [7] Kund P, Paserba J A, Jjarapu V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/AICRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Trans on Power Systems 2004,19(2):1387-1401.
- [8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:26-32.
- [9] IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. Definitions and classification of power stability[J]. IEEE Trans on Power Systems,2004,19(2):1387-1401.
- [10] 苏永春,程时杰,文劲宇. 电力系统电压稳定性及其研究现状[J]. 电力自动化设备,2006,26(2):2-4.
- [11] 郭琼,姚晓宁. 浅析电力系统负荷对电压稳定性的影响[J]. Proceedings of the EPSA,2004,8(3):42-45.
- [12] Zhu SZ, Zheng H J, Li L, et al. Effect of load modeling on voltage stability [R]. Power Engineering Society Summer Meeting,2000:396-400.
- [13] 汤勇,林伟芳,孙华东,等. 考虑负荷变化特性的电压稳定判据分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):12-16.
- [14] 周孝信,郑建超,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):12-16.
- [15] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术,2004,28(9):1-6.
- [16] 电力行业电网运行与控制标准化技术委员会. DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京:中国电力出版社,2001.

- [17] 赵金利,余贻鑫,Zhang Pei. 基于本地相量测量的电压失稳指标工作条件分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(24):1-5.
- [18] 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.
- [19] 夏向阳,张一斌,蔡源. 电力受端系统的稳定问题及其对策分析[J]. 继电器,2005,33(17):74-87.
- [20] 刘宝柱,于继来. 基于阻抗动态步进的 PVZ 快速求解[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):104-109.
- [21] 何仰赞,段献忠. 再论电压崩溃现象的机理[J]. 电力系统及其自动化学报,1995,7(1):1-7.
- [22] Khoi V, Begovic MB, Novosel D, et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(3):1029-1035.
- [23] Corsi S, Taranto G N, Guerra L N A. A real time voltage stability indicators based on phasor measurement unit data [C]. CIGRE, 2008,34(2):108-113.

## Summary of Power System's Voltage Stability Mechanism

ZHEN Lin, TIAN Chen-yang

(Electrical Engineering College Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012)

**Abstract:** On a clear understanding of power system's voltage stability conception, this paper points out that to master the mechanism of voltage stability is the key link of controlling the voltage stability. From the point of view of instability mechanism, there are some factors which can lead the instability of power system's voltage. These factors include the load's dynamic recovery features, the insufficient support of voltage in receiving end of the power system, the supply constraints from the sending end of power system, as well as the comprehensive load factors. This paper carries on comprehensive analysis and evaluation of all above voltage stability mechanism's definitions which defined from four different perspectives.

**Key words:** Power system; Voltage stability; The mechanism; The dynamic characteristics of the load