

电力系统电压稳定与功角稳定问题综述

王永智, 袁 越

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 稳定性问题是电力系统中一个复杂的问题。随着大系统互联方兴未艾,同时市场化之后的电力系统在经济性的驱动下常常在稳定极限边缘运行,系统稳定性成为日益严峻的实际问题,尤其近年屡次出现大系统的稳定破坏事故,更使它成为研究的焦点问题。本文综合论述了电力系统稳定性问题的研究成果,展示了电力系统稳定性问题的一个整体上的掠影。

关键词: 稳定性; 电压稳定; 功角稳定

0 引言

稳定性问题是电力系统中一个及其复杂的问题,早在上世纪二十年代起就被作为一个课题正式提出^[1,2]。如今,由于大系统互联已成为电力事业发展不可逆转的历史潮流,加上大系统稳定性破坏事故的屡次发生,使得稳定性问题成为倍受关注的焦点问题。基于此现状,本文综合论述了电力系统稳定性问题研究的方方面面。从宏观上,根据研究着眼点不同划分,稳定性问题大体上可以归结为电压稳定与功角稳定两个大的方向。经过几十年的发展,两者分别在各自领域取得了丰硕的成果。本文首先对电压稳定与功角稳定破坏的现象和机理进行了描述,然后对稳定性研究的理论依据以及分析方法进行了论述与归纳,进而讨论了提高电力系统稳定性的途径。最后叙述了稳定性研究的未来发展方向。

1 稳定性破坏的现象和机理

1.1 电压失稳的现象和机理

电压稳定性,是指正常运行情况下或遭受干扰后电力系统维持所有母线电压在可以接受的稳态值的能力^[2]。运行着的电力系统在遭受干扰后的几秒或几分钟内,系统中一些母线电压可能经历大幅度、持续性的降低,从而使得系统的完整性遭到破坏,功率不能正常地传给用户。这种情况称为系统电压不稳定^[3]。

电压不稳定最严重的后果是导致电压崩溃。电压崩溃是指系统发生一系列事故后导致一些母线电压持续降低,而功角稳定性有可能并没有破坏的迹象,从而很难预先察觉^[3]。电压崩溃会导致大量负荷的丢失,严重时会造成系统解列。近

年来发生的几起电力系统大停电事故就是电压崩溃的例子。电压崩溃事故是电力系统中发生的灾难性事故,每每造成巨额直接经济损失以及长期大面积停电,成为世界各国致力于杜绝的最严重事故之一。

通常认为电压稳定破坏是同负荷特性相关联的,从而电压稳定性有时也称为负荷稳定性。从这种认识出发,无功平衡能否维持就成了电压稳定的关键。举个例子说明:当负荷大幅度上涨后,系统的无功补偿能力严重不足,调度在全网电压下降过程中未能果断切除部分负荷;当系统无功功率供应不足时,如果继续保持负荷侧的电压水平,势必造成上一级电网电压下降,严重时会造成拖垮高压电网电压,发展为电压崩溃^[4]。

1.2 功角失稳的现象和机理

概括地说,电力系统功角稳定性破坏从根本上是由于发电机输入、输出功率不平衡造成的。在正常的稳态运行情况下,电力系统中各发电机组输出的电磁转矩和原动机输入的机械转矩平衡,因此所有发电机转子速度保持恒定。但在大的扰动发生后,由于系统的结构或参数发生了较大的变化,系统的潮流及各发电机的输出功率发生了较大的变化,从而破坏了原动机和发电机之间的功率平衡,在发电机转轴上产生不平衡转矩,导致转子转速变化^[5]。这样,不同发电机转子之间将产生相对运动,而转子之间相对角度的变化又反过来影响各发电机的输出功率,从而使各个发电机的功率、转速和转子之间的相对角度继续发生变化。这样循环下去可能使系统中的发电机相对角度超越稳定极限造成失稳。这就形成了一个以各发电机转子机械运动和电磁功率变化为主体的机电暂态过程。

由于功角失稳的着眼点在于发电机功角能否保持在允许的范围之内,所以功角稳定性也被称为发电机稳定性。单机无穷大母线模型可以模拟一个纯粹的功角稳定性问题。电力系统正常运行的一个必要条件是各台发电机的转子保持同步速,表现为各发电机的功角保持定值。功角失稳

使得部分机组的转子与系统其它机组失去同步,造成稳定运行的破坏,严重时会导致系统解列。

1.3 电压稳定与功角稳定的联系

功角稳定和电压稳定虽然是稳定问题的两个方面,但是它们之间常存在千丝万缕的联系,在受到小扰动的前提下,很难判断系统在什么条件下发生电压失稳,在什么条件下发生功角失稳。这两种稳定问题在电力系统中可能同时存在,只是在一定的条件下,功角稳定问题更严重些;而在另外的条件下,则是电压稳定问题比较突出。提高电力系统的稳定性,应综合考虑两者所产生的影响。

2 稳定性研究的理论依据

2.1 研究电压稳定的理论依据

电压稳定包括静态电压稳定和动态电压稳定两个方面,前者已存在许多基于潮流的实用计算、分析工具,而后者则从理论上更能准确地反映稳定性问题的动态本质,但其工程应用尚待时日。

静态电压稳定研究普遍认为:负荷的缓慢增加导致负荷端母线电压缓慢下降,在到达电力系统承受负荷增加能力的临界值或接近临界值时,任何使系统状态越出临界值的扰动,如负荷的继续增加、系统故障或系统运行的正常操作都将使负荷母线电压发生不可逆转的突然下降^[4]。潮流方程在静态电压稳定研究中得到了广泛使用,这些静态判据在本质上都是以电力系统的极限输送能力作为静态电压稳定的临界点^[6]。

动态电压稳定问题代表今后的稳定性研究的主要方向。目前理论界对于电压稳定问题比较一致的看法是认为它是一个动态稳定问题,与发电机及其调节系统、负荷、无功补偿系统以及其它电力电子装置、有载调压变压器的抽头调节、直流输电等元件的动态特性有关^[6]。但由于目前对电压崩溃的动态机理和各种元件所起作用的认识还很不充分,也缺乏统一的评价标准,因而理论、模型和分析方法还不成熟,离实用化还有很长的距离。目前已经有一些学者在这一课题上做出了许多有益的尝试。

2.2 研究功角稳定的理论依据

功角稳定问题又成为暂态稳定问题,它是在电力系统稳定性较早研究的问题之一。在早期电力系统稳定性就是专指功角稳定性的概念。

功角稳定性研究的着眼点是系统中发电机的转子角度,通过发电机转子角度能否维持同步作为系统稳定与否的判据。自然地,研究功角稳

定性的一个思路就是在给定的系统状况下,追踪发电机功角的动态变化过程,做出发电机的功角随时间变化的曲线,从而判断出功角稳定情况。而发电机的特性是由一系列微分方程描述的,求发电机的功角变化曲线就是要解发电机微分方程组。而在这样的暂态过程中,发电机又与电力网络联成一个整体,相互作用,不可分割。因此,概括起来,功角稳定研究求取发电机功角曲线的过程,就是基于电力网络方程,联立求解发电机微分方程组。这是功角稳定研究的一个主要的思想。

暂态稳定性研究的另一个思路是从能量角度出发。这种思路不需要借助于某个状态变量的时间响应来判断系统的稳定性,而是通过对特定函数的数值计算结果直接判断系统稳定性的方法。它是通过构造一个代表能量的李雅普诺夫函数来实现的。基于这一思想可以避开直接求取功角曲线的冗繁运算量,对于在线计算的运用有很大的发展潜力。

3 稳定性分析的方法

3.1 电压稳定的研究方法

由于电压稳定研究的理论有静态、动态之分,相应地,分析方法也分为静态与动态两类。因为动态研究方法离实际应用还有很长的距离,文中主要介绍静态电压稳定的分析方法。

首先介绍第一类,裕度指标分析法。裕度指标分析法是指从系统给定运行状态出发,按照某种模式,通过负荷增长或传输功率的增长逐步逼近电压崩溃点,则系统当前运行点到电压崩溃点的距离可作为判断电压稳定程度的指标,称之为裕度指标。这类方法的基本原则是将电网极限传输功率作为电压崩溃的临界点,从物理角度讲是系统中各节点到达最大功率曲线族上的一点。常用的最大功率判据可以是:任意负荷节点的有功功率判据、无功功率判据以及所有负荷节点的复功率之和最大判据等等^[7]。这类方法中,过渡过程的选择是否恰当对方法的有效性有至关重要的作用,而如何处理极限功率附近的潮流雅各比矩阵奇异也是一个关键问题。基于连续潮流的电压稳定裕度计算就是这类方法中的一种,它可以有效地克服极限点附近潮流雅各比阵奇异,求出完整的路径,从而计算出电压稳定裕度^[8-12]。此外,也可以用直接求解的方法解网络方程的方法来求裕度指标^[13],但因其运算量大而精度差的缺点而影响了它的广泛应用。

下面介绍第二类, 状态指标分析法。状态指标分析法指利用一类指标反映系统临近崩溃点的某些特征, 通过计算当前运行点的相应量来间接评价系统当前运行状态域稳定极限的临近程度。常见状态指标有以下几种:

(1)、灵敏度状态指标。它以潮流计算为基础, 以定性物理概念出发, 利用系统中某些量的变化关系, 即它们之间的微分关系来研究系统的电压稳定性^[14,15]。在潮流计算的基础上, 只需少量的额外计算, 便能得到所需的灵敏值。灵敏值计算缺乏统一的灵敏度分析理论做基础, 各文献都按自己的方法进行灵敏度分析, 没有统一的标准。在计算灵敏度指标时, 没有考虑负荷动态的影响, 没有计及发电机无功越限、有功经济调度的影响。灵敏度指标只能反映系统某一运行状态的特性, 而不能计及系统的非线性特性, 不能准确反映系统与临界点的距离。

(2)、潮流多解法指标。潮流多解法以一对相关邻近潮流解之间的距离来判断电压稳定性^[6]。潮流方程解的个数随负荷水平的加重而成对减少, 当系统的负荷增加到临近静稳极限时, 潮流方程只存在两个解, 潮流雅可比矩阵也接近奇异, 这两个解关于临界点对称。这一结论为计算电力系统的极限运行状态提供了一条途径, 间接地克服了潮流方程的雅可比矩阵在临界点奇异而带来的收敛问题。

(3)、最小奇异值或特征值指标。奇异值分析方法是建立在对迭代计算收敛后的潮流方程雅可比矩阵进行奇异分解的基础之上的, 实质是利用奇异值大小来度量当前状态下的雅可比矩阵距离奇异有多远, 以此来评价系统的电压稳定性^[6]。

除了上述列举的各种电压稳定性判别方法之外, 还有 Q-U 法^[2], 以及其它新方法, 如在文献[13]中介绍的将分岔理论引入稳定性分析领域的方法等等。

3.2 功角稳定的分析方法

功角稳定(暂态稳定)的分析方法主要包括基于数值积分的时域仿真法以及基于能量函数的直接法, 下面分别予以讨论。

(1)、时域仿真法。暂态稳定时域仿真法是用数值计算方法求出描述受扰动微分方程组的时间解, 通过各发电机转子之间相对角度的变化判断系统的稳定性, 将系统中任意两台发电机转子角度差的绝对值超过某一极限角度作为暂态失稳的判据^[3]。该方法能够直观地体现方法背后的物

理本质, 方便地展现系统各发电机的功角差, 计算准确可靠, 能够达到工程实际的要求。

时域仿真法在电力系统中的实用起步较早, 已经开发出大量性能良好的应用程序, 在电力系统中得到了广泛的应用。其中著名的软件有: 我国电力科学研究院研制的《交直流电力系统综合计算程序》, 由 BPA 根据美国 WSCC 标准开发的暂态稳定分析程序, PTI 开发的 PSSE, 美国 EPRI 开发的 ETMSP 程序以及比利时的 STAG 程序等等^[3]。

(2)、直接法。时域仿真法的缺点在于: 运算量大, 只能判断稳定性而不能给出稳定裕度, 以及输出信息利用率低。为了克服上述缺点, 基于能量函数的直接法被开发出来。该法是从能量的角度来判断稳定性, 其原理是根据一个辅助函数(即李雅普诺夫函数)的性质来判断系统稳定与否。所以对于一个实际的系统, 首先要构造一个合理的李雅普诺夫函数, 这个函数必须反映系统稳定的特性, 再确定和系统临界稳定所对应的李雅普诺夫函数值; 从而可以通过比较扰动结束时的李雅普诺夫函数值与临界值的大小判别系统的稳定性。近些年基于能量函数的直接法得到的较快的发展, 已经有许多性能良好的软件达到的工程实用的要求, 如基于 EEAC 的直接法应用程序, 已经在电力系统中投入使用。但目前直接法在电力系统稳定计算中仍然无法替代时域仿真法的应用。

4 提高系统稳定性的实用方法

从根本上说, 提高系统的稳定性应该深入研究系统失稳的机理, 对于不同的失稳机制制定不同的控制措施。理论研究成果同实际运行经验相结合, 总结为以下几条:

(1)、充分考虑发电机组的作用。在系统出现电压严重下降的情况下, 保持尽可能多的发电机组运行极为重要, 发电机和励磁机的过负荷能力可以延缓电压崩溃的时间, 但是要利用发电机组的无功过负荷能力, 还需要进一步核定不同发电机组的无功过负荷能力及对保护装置重新进行整定。发电机、同步调相机和静止电压补偿机应具有足够的储备, 足够迅速地使感应电动机不致减速, 过渡事故后的不稳定平衡点。

(2)、充分发挥并联电容器的作用。虽然并联电容器的过分使用是造成电压失去稳定的原因之一, 但是充分发挥并联电容器的作用也可以改善系统的电压稳定性, 因为并联电容器的使用, 可

以使无功功率做到就地补偿,所以发电机可以主要提供有功功率,而预留出更多的无功储备。

(3)、系统在较高的电压水平下运行。系统在较高的电压水平下运行可能并不增大无功储备,但却减少了无功需求,因此使发电机组预留出更多的无功储备,可以运行在远离无功极限的地方,为运行人员预留了对电压的控制。

(3)、事故情况下低电压甩负荷是终止电压进一步下降的有效措施。但是,无功严重短缺情况下有效性可能反映太慢,因为事故情况下既要考虑利用发电机组的过负荷能力,又要考虑发电机组不致因越限引起继电保护动作跳闸^[4]。有效制定根据电压降低的自动跳闸甩负荷策略对于维持系统的稳定性是很重要的。

5 稳定性研究的未来发展方向

5.1 电压稳定性研究的发展方向

动态电压稳定研究是将来电压稳定研究的主要方向。电压稳定性的本质是动态问题,静态方法把它看成一个个准静态状态的过渡过程,没有反映各动态元件的动态机理,不能解释电压稳定性破坏中的许多问题;而且,静态方法往往基于功率极限与电压极限当成相同的概念。已有许多学者对上述假设的严谨性提出了质疑,认为功率极限所对应的并不一定是电压崩溃点。因此,研究人员已经将电压稳定机理研究的重点从静态转向电压稳定动态机理的方向上来,而对负荷的动态特性的研究尤其是当前研究的热点^[6],同时也是难点。如果在动态特性的研究上不能取得突破,电压稳定实用工具只能局限于基于静态理论的分析方法。

此外,新理论与方法引入电力系统电压稳定研究也是一个趋势。例如,上文提到的分岔理论的引入就为动态电压稳定分析提供了一条思路。奇异诱导分岔也是电压稳定动态分析中经常涉及到的动态分岔之一^[16]。而电压稳定指标中计算奇异诱导分岔边界的很少,适合在线计算的快速算法则还是空白。推导计算考虑奇异诱导型分岔点的改进电压稳定指标是很有意义的尝试。

5.2 功角稳定性研究的发展方向

时域仿真法从理论上已经是非常成熟,其改进方法主要在于建立更加完善准确的发电机高阶模型以及负荷模型;选择更精确有效率的数值积分方法,以及尽可能节省机时与内存,加快计算速度,例如通过编制更有效更完善的稀疏实用程序。

而直接法在电力系统中取得广泛应用需要进一步提高其准确度与可靠性。从根本上,直接法的发展在于深入研究现有方法在电力系统中运用失效的原因,从理论上建立更科学的能量函数。从算法上,直接法可以从以下方面进行改善:完善数学模型,适应各种扰动和故障,完善计算方法并改进计算速度和精度。从功能上,直接法还可以用于以下方面:稳定度灵敏度分析,动稳定极限计算,电压稳定分析以及在系统失步时用于启动紧急控制等等。

6 结束语

本文对于日益受人瞩目的电力系统稳定性问题进行了概括与总结,从稳定性发生现象、机理到分析方法、控制手段展开了论述。最后,对未来电力系统稳定性研究方向做了几点展望。

参考文献

- [1] CARSON W. TAYLOR Power System Voltage Stability [M]. 北京:中国电力出版社,2002
- [2] PRABHA KUNDUR. Power System Stability and Control[M]. 北京:中国电力出版社,2001
- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002
- [4] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003
- [5] 殷华,丁坚勇. 电压稳定问题综述 [J]. 东北电力技术,2003,
- [6] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995
- [7] 周晓渊. 电力系统电压稳定分析和控制研究[M]. 浙江大学博士学位论文. 2006
- [8] 李盛林,卢勇,卢志强,杭乃善. 一种求取静态电压稳定裕度的新方法[J]. 继电器, Vol. 34 (9)
- [9] 张尧,张建设,袁世强. 求取静态电压稳定极限的改进连续潮流法[J]. 电力系统及其自动化学报. Vol. 17 (2), 2005
- [10] NIZARES C A C, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8 (1): 1-8.
- [11] Chiang H D, Flueck A J, ShahK S, et al. CPFLOW:A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(2): 623-634
- [12] 胡彩娥. 应用基于连续潮流算法的遗传算法进行静态电压稳定分析[J]. 电网技术, Vol. 28 (15), 2004
- [13] 江伟,王成山,余贻鑫,张沛. 直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J]. 中国电机工程学报. Vol. 26 (10), 2006
- [14] 郭建,韩肖清,王智宏. 电压稳定灵敏度分析计算方法[J]. 山西电力. 2005
- [15] 江伟,王成山,余贻鑫, ZHANG Pei. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法[J]. 中国电机工程学报. Vol. 26 (2), 2006
- [16] 李宏仲,程浩忠,朱振华,李树静. 分岔理论在电力系统电压稳定研究中的应用述评[J]. 继电器. Vol. 34 (4), 2006

作者简介:

王永智(1981-),男,在读研究生,主要研究方向为电力系统静态电压在线监控。

袁越(1966-),男,汉族,工学博士,教授,博士生导师,研究方向:电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、电力经济技术与运营管理。