

基于感应电动机的暂态电压稳定判据的研究

向昌明¹, 谢晓清²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏南京 211102; 2. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏镇江 212004)

摘要:提出一种负荷采用感应电动机模型时的暂态电压稳定的判断方法。该判据通过比较扰动后感应电动机电磁转矩和机械转矩以及转差的变化情况来判断负荷的稳定性,以系统的最大传输功率与负荷功率需求的关系来确定负荷失稳是否会导致暂态电压失稳。以单机单负荷系统和 IEEE39 节点系统为例,用 MATLAB 软件进行仿真分析,仿真结果验证了所提出的方法的准确性。

关键词:暂态电压稳定; 负荷稳定; 感应电动机; 最大传输功率; 稳定判据

中图分类号: TM346

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)06-0025-04

近几十年来暂态电压失稳事故在电力系统中时有发生^[1,2],给国民经济和人民生活带来严重影响。时域仿真法是研究暂态电压稳定问题最常用的方法,它能精确计及动态元件的影响,但计算量大,耗时长,因此一些文献提出了快速判断电力系统暂态电压稳定的方法。文献[3]以电动机功率不平衡量(机械功率与电磁功率之差)的符号和变化趋势或功率不平衡量与机械功率的比值来判断系统的暂态电压稳定性;文献[4]认为受到扰动后,在端电压达到最大值的情况下感应电动机仍减速,则判定系统失去暂态电压稳定,在端电压最小值的情况下仍加速,就可判断它能保持暂态电压稳定;文献[5]以电磁转矩和机械转矩差值达到极值作为判断系统暂态电压失稳的时刻。此外,文献[4]和[5]都把负荷失稳等同于暂态电压失稳,但负荷失稳并不是电压失稳的充分条件^[6],负荷失稳是否会导致暂态电压失稳,还需进一步的判断。本文在文献[5]的基础上,结合负荷失稳与暂态电压失稳的关系,提出了基于感应电动机的暂态电压稳定判据。

1 感应电动机动态特性

感应电动机是电力系统负荷的主要成分,也是最重要的动态负荷,其动态特性对电力系统暂态过程有着显著的影响^[7]。考虑机电暂态的感应电动机的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dE'}{dt} = -2\pi f_0 \cdot E' - [E' - j(X - X')] / T' \\ T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: E' 为转子暂态电势; T' 为暂态时间常数;转子开路电抗 $X = X_s + X_m$; 暂态电抗 $X' = X_s + X_m // X_r$; R_s 和 X_s 分别为感应电动机定子绕组的电阻和漏电抗; R_r 和 X_r 分别为转子绕组的等值电阻和漏电抗; X_m 为励磁

电抗; s 为感应电动机转子转差; T_m 和 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; T_j 为转子惯性时间常数。感应电动机的戴维南稳态等值电路如图1所示的等值电路来模拟^[8]。

图1中,等值电势和阻抗分别为:

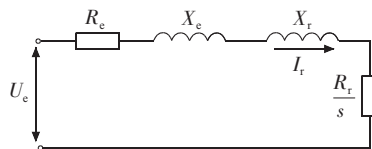


图1 感应电动机戴维南等值电路

$$\dot{U}_e = \frac{jX_m \dot{U}_s}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (2)$$

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m (R_s + jX_s)}{R_s + j(X_s + X_m)} \quad (3)$$

2 暂态电压稳定判据

部分文献将电压稳定等同于负荷稳定,文献[4]和[5]把负荷失稳作为电压失稳的充分条件,认为只要有1台感应电动机失稳,系统即失去暂态电压稳定。但文献[6]则认为负荷失稳不是电压失稳的充分条件,只有对失稳节点的电压支持力度小的系统才会失去电压稳定;文献[9]指出感应电动机的失稳不一定会导致系统电压失稳,应根据系统的具体情况来分析。因此本文对扰动后的系统先判断负荷是否失稳,若负荷稳定,则系统保持暂态电压稳定;若负荷失稳,则进一步判断系统是否会暂态电压失稳。

2.1 负荷失稳判定

感应电动机的电磁转矩、机械转矩与转差的关系曲线如图2所示。

根据给定的端电压和 $T_m = T_e$ 可以得出感应电动机的运行点。由图2可得,感应电动机存在稳定运行点 a 和不稳定运行点 b ,端电压越高,所对应的不稳定运行点的转差越大,若感应电动机的转差大于不稳定平衡

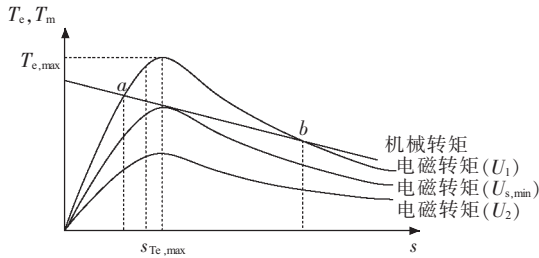


图2 感应电动机转矩转差特性曲线

点的转差,其机械转矩恒大于电磁转矩,感应电动机进入堵转过程,因此当感应电动机的转差大于端电压极大值所对应的不稳定转差时,其转速会逐渐减小。设端电压为极大值时所对应的不稳定转差为 $s_{us(U_{max})}$,故障切除后转差 s_m 选取极小值,若 $s_m > s_{us(U_{max})}$,则判定该负荷失稳,否则该负荷稳定,系统保持暂态电压稳定。

在大扰动的暂态过程中,转矩差极大值对应的时刻驱动转子加速的力矩最大,转子的加速度最大,此时是最有利于转子加速的时刻,可以根据转矩差 ΔT ($\Delta T = T_e - T_m$) 极大值时刻转子的状态给出负荷稳定的判断:在大扰动的过程中,如果转矩差 ΔT 达到极大值 ΔT_{max} 时, $\Delta T_{max} < 0$,即转子仍然减速,转子转差将不断增大,最终堵转,可以判断负荷失稳。

2.2 暂态电压失稳判定

暂态电压失稳往往出现在负荷需求大于系统的最大传输功率,扰动之后线路输送的最大功率减少,达不到负荷的功率需求,因此可以将系统能供给的最大传输功率与负荷需求功率进行比较来判断系统是否失去暂态电压稳定。感应电动机失稳后,若系统能供给的最大传输功率小于感应电动机的需求功率,则系统电压失稳;若系统能供给的最大传输功率大于感应电动机的需求功率,而感应电动机仍然堵转,则是感应电动机本身失稳,系统仍然是电压稳定的。由图1可得,系统供给感应电动机的电磁功率:

$$P_e = \frac{R_r U_c^2 / s}{(R_e + R_r / s)^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (4)$$

当转差变化时,系统能够提供的最大电磁功率:

$$P_{e,max} = \frac{U_c^2 \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2}}{(R_e + \sqrt{R_e^2 + (X_e + X_r)^2})^2 + (X_e + X_r)^2} \quad (5)$$

若由2.1节判断负荷失稳,则比较 $P_{e,max}$ 与电动机负荷机械功率 P_m 。若 $P_{e,max} > P_m$,则系统负荷失稳,系统暂态电压稳定,若 $P_{e,max} < P_m$,则系统暂态电压失稳。

综合以上的分析,本文提出的电力系统暂态电压稳定判断方法为:(1)在故障清除后,若端电压为极大值时所对应的不稳定转差 $s_{us(U_{max})} < s_m$,则该负荷失稳,否则该系统是暂态电压稳定的;(2)在故障清除后,

如果转矩差达到极大值时,转子仍然减速,即 $\Delta T_{max} < 0$,则该负荷失稳。

对于负荷失稳的系统,若 $P_{e,max} > P_m$,则系统负荷失稳,暂态电压稳定,否则系统暂态电压失稳。

3 仿真分析

对所提出的暂态电压稳定判据进行仿真验证,采用 MATLAB/Simulink 软件进行时域仿真。

3.1 单机单负荷系统

选择图3所示的单机单负荷系统,设发电机母线为平衡节点,其电压幅值为1 p.u.,线路阻抗为 $Z = j0.02786$ p.u.,变压器变比为115/13.2,负荷采用60%感应电动机+40%恒阻抗负荷,感应电动机额定容量为800 MV·A,额定电压为13.2 kV,定子电阻 $R_s = 0.01$ p.u.,定子电抗 $X_s = 0.145$ p.u.,励磁电抗 $X_m = 3.3$ p.u.,转子电阻 $R_r = 0.008$ p.u.,转子电抗 $X_r = 0.145$ p.u.。故障采用5s时输电线路末端发生三相短路,经过时域仿真分析可得,故障切除时间为0.268s时,感应电动机失去稳定。采用本文判断方法所得的暂态电压稳定分析结果如表1所示。

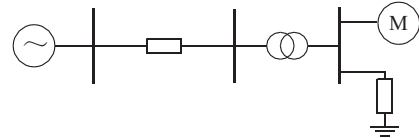


图3 单机单负荷系统

表1 单机单负荷系统暂态电压稳定分析结果

MATLAB 仿真		本文判断方法		
故障切除时刻 /s	时域仿真结果	判断时刻 /s	判据	结论
5.240	暂态电压稳定	5.281	$s_{us(U_{max})} = 0.1835 > s_m = 0.14$	暂态电压稳定
5.260	暂态电压稳定	5.310	$s_{us(U_{max})} = 0.1831 > s_m = 0.16$	暂态电压稳定
5.269	电动机失稳	5.302	$s_{us(U_{max})} = 0.1827 > s_m = 0.1655$	暂态电压稳定
5.275	电动机失稳	5.308	$s_{us(U_{max})} = 0.1821 > s_m = 0.1815$	暂态电压稳定
5.276	电动机失稳	5.315	$s_{us(U_{max})} = 0.1820 < s_m = 0.1831$ $P_{e,max} = 1.25 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定
5.280	电动机失稳	5.311	$s_{us(U_{max})} = 0.1819 < s_m = 0.1902$ $P_{e,max} = 1.245 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定
5.480	电动机失稳	5.517	$\Delta T_{max} = -0.012 < 0$ $P_{e,max} = 1.245 > P_m = 0.9$	电动机失稳,但暂态电压稳定

由表1可以看出,故障切除时间小于0.268s,时域仿真和本文判断方法的结论均为系统暂态电压稳定;切除时间大于0.275s时,2种方法都能得出电动机失稳的结论;同时,本文判断方法所得的负荷失稳极限切除时间为0.275s,与时域仿真方法的相对误差为2.6%,因此可以得出:本文判断方法可以较准确地判

断负荷稳定性以及系统的暂态电压稳定性。

但当故障切除时间在(0.269,0.276)区间内时,本文判断方法的结论与时域仿真结果不一致,这主要是由于第2节判断方法(1)偏于乐观造成的。当 $s_{us(U_{max})}$ 略大于 s_m 时,本文方法判定为系统暂态电压稳定,但当转差 s 从 s_m 逐渐增大,感应电动机的电磁转矩下降,可能会小于机械转矩,从而导致感应电动机堵转;当 $s_{us(U_{max})}$ 与 s_m 差值较大时,即故障切除时间较短时,由于电动机端电压较高,对应的电磁转矩较大,不会随着 s 的增大而小于机械转矩,所以与时域仿真的结果相同。

以故障持续时间0.40 s为例分析系统的暂态电压稳定性,系统最大传输功率、感应电动机的机械功率以及端电压曲线如图4所示。故障后系统提供的最大电磁功率 $P_{e,max}$ 大于感应电动机的机械功率,说明系统提供的功率能够满足负荷的功率需求,因此虽然感应电动机堵转,但负荷的端电压保持在0.9 p.u.以上,并没有低于限定值0.75 p.u.^[9],所以负荷失稳并没有引起电压失稳,系统还是暂态电压稳定的。

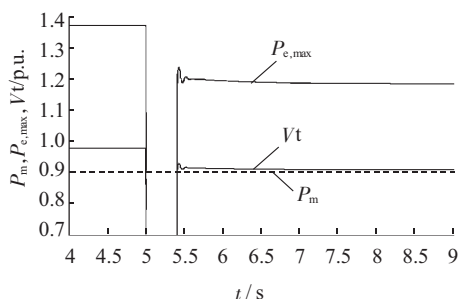


图4 系统最大传输功率和负荷端电压

3.2 IEEE39 节点系统

IEEE39 节点系统如图5所示。假设节点31为无穷大平衡节点,其电压维持等于不变,发电机采用经典二阶模型。系统初始潮流及线路参数参见文献[10]。对发电机端的负荷节点39和发电机升压变高压侧的负荷节点20,23,25,29采用恒阻抗负荷,而其他负荷节点采用感应电动机并联恒阻抗模型,模型参数采用3.1节的值。故障采用节点15于5 s发生三相短路,经过一定时间清除故障。经过时域仿真分析可得,故障切除时间为0.151 s时,系统失去暂态电压稳定。以节点15的感应电动机为分析对象,系统的暂态电压稳定分析结果如表2所示。

由暂态电压稳定分析结果可以看出,本文判断方法所得的负荷失稳极限切除时间为0.182 s。因此可以得出,与时域仿真法相比较,本文的方法可以比较快速地判断系统的暂态电压稳定性,且准确度较高。

以故障持续时间0.22 s为例来分析系统的暂态电压稳定性。负荷节点3,15和18的端电压如图6所示。负荷15和18节点的系统最大传输功率如图7所示。

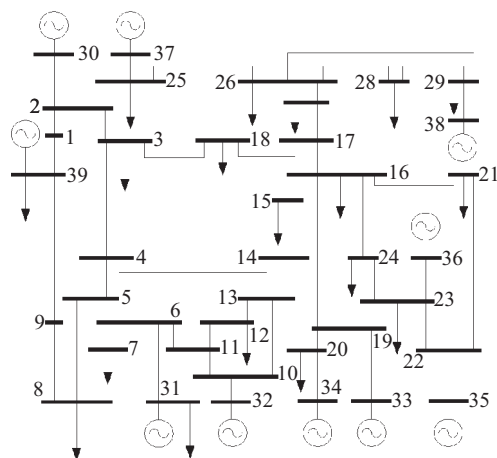


图5 IEEE39 节点系统

表2 IEEE39 节点系统暂态电压稳定分析结果

MATLAB 仿真		本文判断方法		
故障切除时刻 /s	时域仿真结果	判断时刻 /s	判据	结论
5.030	暂态电压稳定	5.061	$\Delta T_{min}=0.006>0,$ $s_{us(U_{max})}=0.2031>s_m=0.12$	暂态电压稳定
5.151	暂态电压稳定	5.191	$s_{us(U_{max})}=0.1865>s_m=0.1750$	暂态电压稳定
5.152	暂态电压稳定	5.182	$s_{us(U_{max})}=0.1864>s_m=0.1752$	暂态电压稳定
5.182	暂态电压稳定	5.215	$s_{us(U_{max})}=0.1830>s_m=0.1823$	暂态电压稳定
5.183	暂态电压稳定	5.220	$s_{us(U_{max})}=0.1826<s_m=0.1828$ $P_{e,max}=0.880>P_m=0.92$	暂态电压稳定
5.205	暂态电压稳定	5.233	$s_{us(U_{max})}=0.1799<s_m=0.1932$ $P_{e,max}=0.872>P_m=0.92$	暂态电压稳定
5.400	暂态电压稳定	5.445	$\Delta T_{max}=-0.015<0,$ $P_{e,max}=0.868>P_m=0.92$	暂态电压稳定

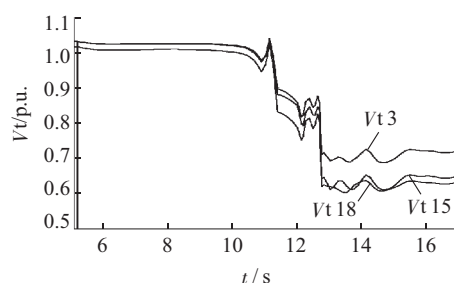


图6 负荷节点3,15和18的端电压

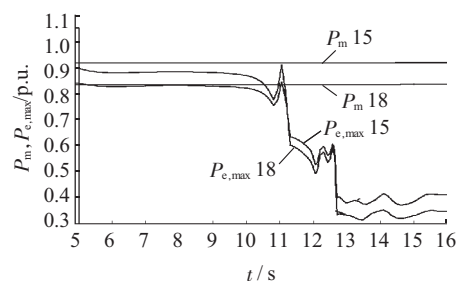


图7 系统最大传输功率

母线3,15和18都有感应电动机并联恒阻抗模型的负荷,且故障点远离发电机,处于负荷区域。扰动后,

负荷节点的电压经过波动最终跌落到限定值 0.75 p.u. 以下。作为主导负荷节点,节点 15 的最大传输功率无法满足动态负荷的功率需求,与节点 15 相比,节点 18 离故障点较远,故障后系统最大传输功率较接近于感应电动机的机械功率,但随着节点 15 失去稳定,其最大传输功率逐渐减小,最终也远小于感应电动机的机械功率,所以系统发生暂态电压失稳。

4 结束语

本文提出了一种基于感应电动机的暂态电压稳定判据,该方法通过转矩差极大值时刻的正负性以及比较故障后转差极值与负荷电压极大值时刻的不平衡转差来判断负荷是否失稳,并以系统的最大传输功率能够满足负荷的功率需求来确定负荷失稳是否会导致暂态电压失稳。通过 MATLAB/Simulink 仿真分析验证了本文方法能够准确、方便地判断和区分系统的暂态电压稳定性和负荷失稳,且与时域仿真相比,缩短了判定时间。

参考文献:

- [1] 张晓阳,王朝明,马春生.考虑电压稳定的 AVC 系统的研究[J].江苏电机工程,2010,29(2):30-33.
- [2] 张洪喜.基于 PMU 的支路电压稳定指标[J].江苏电机工程,2012,31(2):59-62.
- [3] 段献忠,何仰赞,陈德树.仿真计算中暂态电压稳定性的判断[J].华中理工大学学报,1995,23(4):25-28.
- [4] 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.
- [5] 孙华东.计及感应电动机负荷的电压稳定分析及其应用研究[D].北京:中国电力科学研究院,2005.
- [6] 廖其龙,颜伟,刘欢.负荷失稳的有界性分析及其与电压稳定的关系[J].电力系统自动化,2010,34(3):38-43.
- [7] 林舜江,李欣然,刘杨华.考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法[J].中国电机工程学报,2009,29(4):14-20.
- [8] 汤涌.电力系统电压稳定性分析[M].北京:科学出版社,2011:32-33.
- [9] 李鹏,余贻鑫,贾宏杰.关于更精确的电压稳定极限描述中所需模型与方法的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):21-26.
- [10] 高明,姚建国,张文斌,等.对分布式潮流协调计算收敛机理的一种新分析[J].江苏电机工程,2008,27(4):58-62.

作者简介:

向昌明(1965),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事电力系统运行和技术工作;
谢晓清(1988),男,江苏无锡人,硕士研究生,从事电力系统运行与控制工作。

Research on the Criterion for Transient Voltage Stability Based on Induction Motor

XIANG Changming¹, XIE Xiaoqing²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co.Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Maintenance Branch, Jiangsu Electric Power Company, Zhenjiang 212004, China)

Abstract: A criterion for transient voltage stability of the power system with induction motor is proposed. The criterion determines the stability of the induction motor by analyzing slip change and comparing the values of electromagnetic torque and mechanical torque. Whether transient voltage instability of power system would be introduced by load instability is determined by the relationship between power systems' maximum power transmission capacity and load's power demand. The correctness of the proposed criterion is verified by the simulation results of a single-generator-single-load system and the IEEE39-bus system.

Key words: transient voltage stability; load stability; induction motor; maximum transmission power; stability criterion

(上接第 24 页)

An Adaptive Automatic Switching Device Based on Substation Digital Data

FENG Yingchun¹, LU Shengzhi¹, YUAN Song²

(1. Yangzhou Electric Power Company, Yangzhou 225001, China;

2. Nantong Electric Power Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Traditional automatic switching device lacks of flexibility in load-shedding. Adaptive automatic switching device is proposed to against the defect of traditional device. This paper introduces the principle of adaptive automatic switching device. Information interaction between the device and the substation integration automation system is discussed. The control processes of station equipment in the cases of normal state and fault state are studied. The proposed device intelligently shed less-important load according to real-time load situation. This approach can avoid fault expand brought by transformer overload after automatic switching device activated. It helps to improve power supply reliability and economy.

Key words: Adaptive; Automatic switching device; Ethernet network; Load-shedding