

送端感应电动机负荷无功特性对送出极限的影响

张 进, 贺仁睦, 王 鹏, 石景海, 马 瑞, 胡国强

(华北电力大学电气工程学院, 北京市 102206)

摘要:通过分析计及转子电磁暂态的三阶感应电动机负荷模型在定子三相接地过程中的响应,指出位于系统送端的感应电动机负荷的无功倒送特性在一定时段内对系统送端电压有一定的支撑作用。分析了电压支撑作用对系统送出极限的影响。将华北电网典型送端张家口地区实测综合负荷模型(以感应电动机为主)应用于沙岭—昌平线极限切除时间的计算,并与采用不同比例 ZIP 负荷模型的计算结果进行比较,验证了理论分析的结果。说明张家口地区(送端)负荷模型对系统送出极限的灵敏度很高;动态负荷模型具有静态负荷模型难以模拟的特性。强调了在电网稳定计算中采用动态负荷的必要性,从无功角度研究了负荷模型在暂态稳定计算中的应用,提供了新的思路。

关键词:无功倒送; 负荷模型; 感应电动机模型; 系统送出极限

中图分类号: TM714

0 引言

随着电力系统的快速发展,对电力系统暂态稳定计算的精度要求越来越高^[1,2]。在发电机、线路、各种控制装置等数学模型比较成熟的情况下,负荷模型的准确度已经成为提高暂态稳定计算精度的瓶颈。当前,我国正在进行全国联网,大区电网交流弱联网的暂态仿真计算中均不同程度地出现了潮流断面极限输送功率为 0 或接近于 0 的明显不合理情况。其中负荷模型的选取对计算结果起关键作用。

负荷模型对暂态稳定计算影响的机理十分复杂^[3~8]。文献[5,6]研究了台湾电网使用不同类型负荷模型对暂态和小信号稳定的影响;文献[7]讨论了不同地点、不同电压等级应用负荷模型对暂态稳定的影响。但这些研究大多针对具体电网,采用典型负荷模型参数进行计算,给出定性结论,缺乏对负荷模型作用的分析,很难指导负荷模型的应用。

目前,电网运行部门大多希望采用比较简单的静态负荷模型来模拟系统动态负荷的特性。这种简化只考虑感应电动机转子机械动态,忽略感应电动机转子绕组的电磁暂态。文献[6]研究表明,忽略转子绕组电磁暂态的一阶感应电动机机械模型在有功响应上与计及转子电磁暂态的三阶感应电动机模型相似,而在无功响应上有较大差别,但并未进一步指出这种差别的性质及其对系统送出极限的影响。

本文对三阶感应电动机模型在电压下降时的无

功响应特性进行了研究。指出当负荷母线电压下降到一定程度,感应电动机会向系统倒送无功;提出感应电动机负荷的无功倒送特性在短期内会对送端电压产生一定的支撑作用,从而对系统的送出极限有明显影响。利用在华北电网的典型送端张家口地区实测动态负荷数据,建立实测综合负荷模型。将实测的负荷模型应用于沙岭(张家口)—昌平 500 kV 线路暂态稳定极限切除时间计算,并与静态负荷模型的计算结果进行比较,验证了位于系统送端的感应电动机模型的无功倒送特性对系统送端电压的支撑作用及对系统送出极限的影响。该结果也说明静态负荷模型很难描述动态负荷无功倒送特性,强调了使用动态负荷(感应电动机)模型的必要性。

1 感应电动机响应特性

目前,电力系统时域仿真中的感应电动机负荷模型一般采用计及转子绕组电磁暂态的三阶机电暂态模型。它比较精确地反映了转子绕组对电磁暂态的影响,其暂态等值电路如图 1 所示,模型如下:

$$\begin{cases} p\dot{V}' = -js\dot{V}' - \frac{\dot{V}' - j(X - X')\dot{I}}{T'} \\ 2T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \\ \dot{V}_s = \dot{V}' + (R_s + jX')\dot{I} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{V}'$ 为暂态电抗后电势; X' , X 分别为暂态电抗、同步电抗; T' 为定子开路暂态时间常数; s 为感应电动机滑差; T_j 为惯性时间常数; T_m , T_e 分别为机械转矩、电磁转矩; $\dot{V}_s$ 为感应电动机端电压; R_s 为定子电阻。

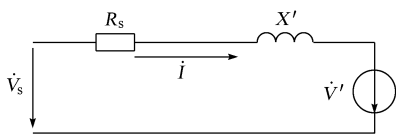


图 1 感应电动机暂态模型等值电路
Fig. 1 Dynamic equivalent circuit of induction motor

基于感应电动机动态等值电路,分析对感应电动机定子三相接地短路后的响应。一般为了简化分析,可以认为感应电动机定子先开路,然后间隔极短的时间突然发生三相接地短路。在感应电动机定子开路瞬间之前,定子电压为 $\dot{V}_{t=t_0-} = \dot{V}_s$ 。当感应电动机定子开路瞬间,转子绕组为闭路绕组,突变过程发生瞬间,转子磁链保持不变。由于惯性,转子继续以转速 ω_r 旋转。在定子绕组中感应出频率 ω_r 的衰减正弦电势波。一般认为感应电动机滑差 $s \ll 1$,在分析中近似认为 $s=0$,即 $\omega_r = \omega_0$ 。该正弦电势波对应于暂态等值电路中的暂态电抗后电势 $\dot{V}'$ 。在定子开路瞬间,感应电动机的开路电压迅速下降为 $\dot{V}_{t=t_0+} = \dot{V}'$,然后以时间常数 T_0' 衰减。

假设 $s=0$,在感应电动机定子短路接地过程中,感应电动机的暂态电抗后电势可以表示为:

$$V'(t) = V_0' e^{-t/T_0'} \quad (2)$$

在暂态电势的作用下,定子电流很快衰减为 0,进而改变方向,释放电机内部磁场所蕴涵的能量。根据 IEEE 推荐的参数,感应电动机 T_0' 一般为 $0.093 \text{ s} \sim 1.400 \text{ s}$ 。本文采用 IEEE 推荐的工业电动机模型参数,计算了故障切除期间的感应电动机暂态电抗后电势,变化曲线如图 2 所示。

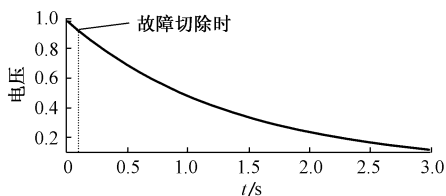


图 2 感应电动机暂态电压变化曲线
Fig. 2 Transient voltage curve of induction motor

如果感应电动机负荷母线附近发生短路接地,电力系统中继电保护装置动作迅速,一般在几个周期内切除故障。假设故障在 5 个周期内被切除,由图 2 看出,在故障期间及切除故障后的一段时间内感应电动机的暂态电压都高于感应电动机端电压。此时,感应电动机相当于一个无功电源。图 3 为采用 IEEE 推荐的工业电动机参数感应电动机的动态响应仿真曲线(参数见表 1)。仿真从 0 s 开始,0.2 s 时电压从 1.0 下降到 0.5,0.3 s 时恢复到 1.0。

明显可以看出此时电动机发生了无功倒送现象。

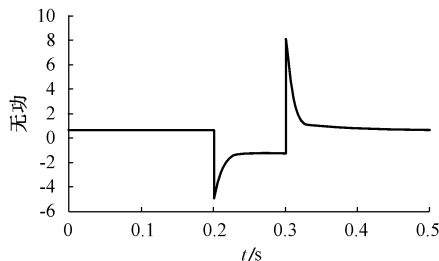


图 3 感应电动机无功响应
Fig. 3 Reactive power response of induction motor

表 1 模型参数
Table 1 Model parameters

负荷点	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A	B	Z_p	Z_q	I_p
沙岭	0.050	0.106	2.24	0.020	0.170	1.18	1.00	1.0	0.4	-4.00	0.5
候家	0.100	0.800	4.71	0.300	0.130	1.14	0.78	1.0	0.4	-3.49	0.5
IEEE	0.035	0.094	2.80	0.048	0.163	0.93	1.00	1.0	1.0	1.00	0.0

注:表中各项参数定义见文献[9]。

从物理意义上说,感应电动机在启动时从电网吸收大量无功,建立磁场,提供机电能量转换的环境。当定子电压下降,感应电动机内部磁场减弱,释放能量,感应电动机及电力系统中线路的 $X \gg R$,感应电动机类似于一个无功电源,向电网倒送无功功率,恰好与感应电动机启动过程相反。文献[2]在利用实测负荷模型进行短路电流计算时也发现了感应电动机倒送无功电流的现象。

从负荷的实测响应数据看,这也是比较普遍的一个现象。图 4 为河北某地负荷在电压下降时段内无功功率的平均值与稳态无功数据的统计图。从实测数据看,无功倒送现象很明显。实测数据与理论分析结果相吻合,说明三阶感应电动机负荷模型比较准确地描述了真实负荷的无功响应。

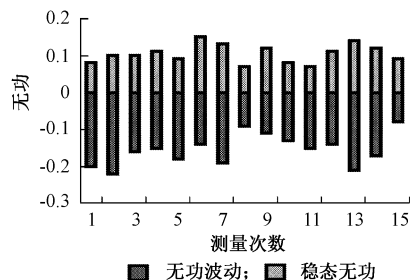
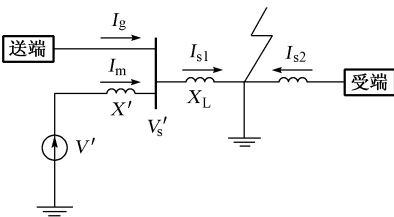


图 4 负荷无功动态响应统计
Fig. 4 Statistics of dynamic response of reactive power

当感应电动机位于系统送端时,发电机出口附近短路,可用图 5 所示简化系统表示。可以看出,线路发生故障时,感应电动机负荷向短路点倒送无功电流。送端母线(负荷母线)电压如下:

$$V_s = I_{s1} X_L = (I_g + I_m) X_L \quad (3)$$



X_L 为负荷母线到短路点之间的电抗; I_m 为感应电动机短路电流;
 I_g 为发电机短路电流; I_{s1} 为线路短路电流, $I_{s1} = I_g + I_m$

图 5 位于送端感应电动机负荷示意图
Fig. 5 Schematic diagram of motor load in sending end

由式(3)可知,感应电动机负荷在故障期间倒送无功电流增大了短路电流,在短期内对送端的母线电压有一定的支撑作用。

2 算例

电力系统中,各个元件紧密联系、相互作用。为了验证上述理论,分析感应电动机无功特性对系统送出极限的影响,本文建立了华北电网典型送端张家口地区的实测综合负荷模型,并将其应用于系统送出极限计算。

2.1 负荷模型结构及实测参数

实测负荷模型采用改进综合负荷模型结构,分为动态部分和静态部分,其中动态部分采用 T 形三阶感应电动机数学模型,静态部分采用负荷静特性 ZIP 模型结构。结合遗传算法和单纯形算法,采用多曲线拟合综合参数辨识^[9,10],本文建立了张家口地区侯家、东三坡、沙岭电厂厂用电等负荷点的实测负荷模型。参数见表 1、表 2。

表 2 各类负荷比例
Table 2 The proportion of various load

负荷组成	侯家		沙岭	
	有功/(%)	无功	有功/(%)	无功
电动机	44.90		98.60	
恒阻抗	22.04	-3.491 60	0.56	-4.0
恒电流	27.50	3.389 24	0.70	4.6
恒功率	5.51	0.599 20	0.14	0.6

值得注意的是 ZIP 部分无功负荷模型系数部分为负数。在物理上,负数表示对感应电动机无功部分的补偿,数值通过辨识得到。

表 2 实测数据辨识结果显示沙岭的电动机负荷比例高达 98.6%,与沙岭电厂厂用电基本为电动机负荷的实际情况吻合。

2.2 送出极限计算及分析

位于张家口电网的沙岭电厂发电容量为 8×300 MW。张家口地区电网拓扑与初始潮流见图 6。沙岭电厂所发电能 80% 以上都送北京电网,只有不

到 20% 供当地电网,是一个典型的系统送端。

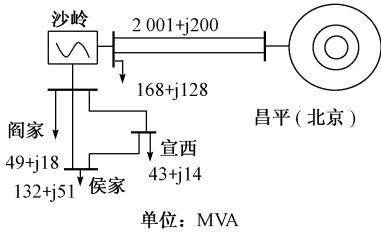


图 6 沙岭—昌平接线图
Fig. 6 Shaling-Changping line

目前,华北电网暂态稳定计算使用的负荷模型为 40% 恒阻抗 + 60% 恒功率。

仿真计算中,发电机模型为 E_q' 恒定的经典模型。故障设置为沙岭—昌平 500 kV 双回线中一回在沙岭侧出口三相永久接地短路。分别计算张家口地区(阎家、侯家、宣西、沙岭厂用电)采用两种不同负荷模型下的极限切除时间。情况 1 为全网负荷模型均采用 40% 恒阻抗 + 60% 恒功率负荷模型;情况 2 为张家口地区采用实测负荷模型,其他地区采用 40% 恒阻抗 + 60% 恒功率负荷模型。计算结果如下:情况 1 极限切除时间为 5.3 个周期,情况 2 极限切除时间为 5.8 个周期。

在本例运行方式下,张家口地区发电厂已经全部满发,减少张家口地区负荷计算功率传输极限的方法很难分析负荷模型的影响,因此选择计算与极限传输功率同方向变化的极限切除时间。从计算结果看,情况 2 的极限切除时间明显长于情况 1。

从表 1、表 2 可以看出,张家口地区的负荷中感应电动机占的比例很大,负荷的特性主要表现为感应电动机的特性。对于张家口地区来说,当地有功负荷只占联络线传输有功功率的 16% 左右,而无功负荷为联络线传输无功功率的 105% 左右。调整张家口地区电网有功负荷模型中静态负荷模型各类负荷的比例,计算出的极限切除时间变化也很小,说明负荷的有功特性对极限切除时间的影响很小,无功负荷特性在这里起了主导作用。

限于实际条件,缺乏受端区域的负荷实测数据。而本文目的是分析研究送端负荷模型对系统功率极限的影响,因此在电压波动较小、负荷模型影响也较小的受端区域采用相对简单的 46 静态负荷模型。

值得注意的是,本例在暂态稳定计算中发电机模型采用 E_q' 恒定的经典模型,因此,排除了发电机控制器对计算结果的影响。

运行部门从应用角度出发,往往希望采用尽量简单的负荷模型,本文在华北电网无功负荷模型采用静态负荷模型的基础上,调整恒阻抗负荷与恒功

率负荷的比例,再次计算极限切除时间,计算结果见表3。可以看出,如果恒阻抗比例系数不为负数,即呈现无功电源特性。极限切除时间变化很小,更加说明了感应电动机的无功倒送特性。而静态负荷模型很难模拟这种特性。

表3 计算结果
Table 3 Result of calculation

恒阻抗:恒功率	极限切除时间
4:6	5.34个周期
1:9	5.36个周期
9:1	5.38个周期
-3:4	5.85个周期

3 结论

本文分析、仿真了三阶感应电动机在电力系统暂态分析中的响应,并将送端实测综合负荷模型应用于华北电网系统送出极限计算,得到以下结论:

1)计及电磁暂态的三阶感应电动机负荷模型在电压波动时会倒送无功功率。

2)位于送端的感应电动机负荷模型倒送无功的特性在短期内对电压有一定的支撑作用,对系统送出极限影响很大,而且这种特性很难用静态负荷模型模拟。

3)华北电网张家口地区功率送出极限计算中,送端负荷模型对稳定计算结果具有较高的灵敏度。

系统受端地区功率因数较高、负荷无功特性影响较小,更重要的是受端地区网络拓扑、负荷分布都很复杂。负荷模型对暂态稳定的影响需要更多的实测数据和更加详细的分区进行研究。

参考文献

[1] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究. 电网技术, 2000, 24(12): 1—4.
HE Ren-mu. Research into Veracity of Power System Simulation. Power System Technology, 2000, 24(12): 1—4.
[2] 贺仁睦, 王卫国. 广东电网动态负荷实测建模及模型有效性的研究. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 78—82.

HE Ren-mu, WANG Wei-guo. Measurement-based Dynamic Load Modeling and Model Validation on Guangdong Grid. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 78—82.
[3] KOSTEREV D N, TYLOR C W. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3).
[4] IEEE Task Force. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3).
[5] 李颖, 贺仁睦. 负荷与 PSS 相互作用对系统动态稳定的影响. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 40—44.
LI Ying, HE Ren-mu. Effects of the Interaction Between Load and PSS on Power System Dynamic Stability. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 40—44.
[6] 鞠平, 潘学萍, 韩敬东. 3种感应电动机综合负荷模型的比较. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 40—47.
JU Ping, PAN Xue-ping, HAN Jing-dong. Comparison of Three Composite Induction Motor Load Models. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 40—47.
[7] LES P, DMITRY K, PETER M. An Interim Dynamic Induction Motor Model for Stability Studies in the WSCC. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1108—1115.
[8] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 1—6.
JU Ping. Theory and Practice of Load Modeling in Power Systems. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 1—6.
[9] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨识. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 18—24.
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Parameter Identification of Dynamic Load Model Using Multi-curve Fitting. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 18—24.
[10] SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling—Model Structure. In: Proceedings of 2003 IEEE Bologna PowerTech. Bologna (Italy): 2003.

张 进(1977—),男,博士研究生,研究方向为电力系统仿真有效性验证、负荷建模. E-mail: zjlhf2002@sohu.com
贺仁睦(1944—),女,教授,博士生导师,研究方向为负荷建模、电力系统稳定分析。
王 鹏(1973—),男,博士,副教授,研究方向为负荷建模、电力市场。

Influence of Reactive Power Characteristic of Sending-end Induction Motor on System Sending Limitation

ZHANG Jin, HE Ren-mu, WANG Peng, SHI Jing-hai, MA Rui, HU Guo-qiang
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The dynamical response of three-order induction motor based load model is analyzed when its stator windings is grounded. As a result, this paper proposes that during disturbance the reactive power releasing of induction motor located in sending-end would sustain system voltage. It benefits system stability. Measured integration load model (induction motor+ZIP) and static load model (ZIP) of Zhangjiakou district are used to calculate critical clearing time of Shaling-Changping 500 kV line. And the Comparison of results verifies the theoretical analysis. This paper emphasizes the validity of measured dynamic load model and presents a new idea, which is to study power system transient stability from the point of reactive power view.

This work is supported by Scientific and Technological Project of North China Power Group, and Natural Science Fund of Beijing (No. 2003-8656).

Key words: reactive power releasing; load model; induction motor model; system sending limitation