

Impact of Load Model on Short-Circuit Current in Tianjin Power Grid

Liping Qiu¹, Xiaojun Tang¹, Guangyao Yu², Zhenbin Li³, Zhigang Huang³

¹China Electric Power Research Institute, Beijing

²State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin

³State Grid Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin

Email: qiulp@epri.sgcc.com.cn, tangxj@epri.sgcc.com.cn, guangyao.yu@tj.sgcc.com.cn

Received: May 24th, 2016; accepted: Jun. 3rd, 2016; published: Jun. 13th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the building of UHV substation, Tianjin power grid will form 1000/500 kV electromagnetic ring network, which will lead to the improvement of the short-circuit current, and even make some short-circuit current of bus exceed the switch breaking capacity. Load model is an important factor affecting the level of short-circuit current of power grid, in this paper the influence of the static load and induction motor load on the short-circuit current in Tianjin power grid is analyzed, and the mechanism is given.

Keywords

Load Model, Short-Circuit Current, Tianjin Power Grid, UHV

负荷模型对天津电网短路电流的影响

邱丽萍¹, 唐晓骏¹, 于光耀², 李振斌³, 黄志刚³

¹中国电力科学研究院, 北京

²国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津

³国网天津市电力公司, 天津

Email: qiulp@epri.sgcc.com.cn, tangxj@epri.sgcc.com.cn, guangyao.yu@tj.sgcc.com.cn

收稿日期: 2016年5月24日; 录用日期: 2016年6月3日; 发布日期: 2016年6月13日

摘要

特高压接入天津电网后,天津电网将形成1000/500 kV电磁环网,导致电网短路电流水平提高,甚至导致部分母线短路电流超标。负荷模型是影响电网短路电流水平的重要因素,本文针对各静态负荷及感应电动机负荷对天津电网短路电流的影响进行了分析,并从机理上给出了解释。

关键词

负荷模型, 短路电流, 天津电网, 特高压

1. 引言

随着 1000 kV 天津南站的建成,特高压电网将形成“蒙西~晋北~北京西~天津南”(小北横通道)以及“锡盟~北京东~天津南~济南”(东纵通道)两个流经天津电网的特高压送电通道。另外南蔡 500 kV 输变电工程,以及吴庄至静海双回 500 kV 线路的建成,天津电网将形成与华北电网的 1000 kV/500 kV 电磁环网,天津主网短路电流水平较特高压电网接入前有所变化,采用不同的负荷模型进行短路电流计算有可能产生相差明显的短路电流计算结果。

本文针对静态负荷、感应电动机负荷对天津电网短路电流水平的影响进行了计算分析,并从机理上给出了解释。

2. 特高压接入后天津电网短路电流水平

2.1. 仿真计算采用的负荷模型

天津电网短路电流仿真计算分析采用静态恒阻抗、恒电流、恒功率以及感应电动机+恒阻抗模型,感应电动机比例分别取 30%、50%、60%,感应电动机模型选用 III 型感应电动机,具体参数如表 1 所示。其中:

- R_s ——感应电动机定子电阻,电动机容量基值下的标幺值;
- X_s ——感应电动机定子电抗,电动机容量基值下的标幺值;
- X_m ——感应电动机激磁电抗,电动机容量基值下的标幺值;
- R_r ——感应电动机转子电阻,电动机容量基值下的标幺值;
- X_r ——感应电动机转子电抗,电动机容量基值下的标幺值;
- T_j ——感应电动机的惯性时间常数,单位:秒;

2.2. 天津电网短路电流计算分析

短路电流计算采用 2016 年方式数据,天津电网负荷水平约为 14,584 MW,机组采用全开机方式。特高压天津南 500 kV 母线分列运行,分别通过 500 kV 双回线接入静海和板桥站。

对天津 500 kV 及 220 kV 电网进行短路电流计算分析,结果见表 2,可以看出,采用不同的负荷模型,对天津电网短路电流计算结果影响较为明显,如采用静态负荷模型时所有的 500 kV 及 220 kV 母线短路电流水平均不超过其开关遮断容量(天津电网 500 kV 母线开关遮断容量 63 kA,220 kV 母线开关遮断容量 50 kA)。考虑感应电动机模型或感应电动机比例增加到一定程度后,出现部分 220 kV 母线短路电流水平超过其开关遮断容量的情况。

另外,从短路电流计算结果还可以得出如下结论:

Table 1. Parameters of type III Induction motor
表 1. III 型感应电动机参数

| R_s | X_s | X_m | R_r | X_r | T_j |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.02 | 0.18 | 3.5 | 0.02 | 0.12 | 2 |

Table 2. The simulation result of short-circuit current of Tianjin power grid
表 2. 天津电网短路电流仿真计算结果

| 母线名称 | 电压(kV) | 恒阻抗 | 恒电流 | 恒功率 | 30%电动机 | 50%电动机 | 60%电动机 |
|------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 吴庄 | 500 | 56.10 | 55.65 | 54.93 | 57.73 | 58.53 | 58.88 |
| 静海 | 500 | 50.71 | 50.31 | 49.66 | 51.55 | 51.98 | 52.16 |
| 津北 | 500 | 48.40 | 47.76 | 46.66 | 53.15 | 51.95 | 52.43 |
| 屈店 | 220 | 47.69 | 47.13 | 46.29 | 54.14 | 57.58 | 59.11 |
| 滨海 | 500 | 47.58 | 46.98 | 46.01 | 50.37 | 51.67 | 52.2 |
| 吴庄 | 220 | 47.45 | 47.13 | 46.59 | 48.99 | 49.94 | 50.39 |
| 津北 | 220 | 47.44 | 46.9 | 46.09 | 50.8 | 56.27 | 57.67 |
| 芦台 | 500 | 47.38 | 46.9 | 46.31 | 49.12 | 49.92 | 50.26 |
| 津南乙 | 500 | 45.31 | 44.92 | 44.3 | 45.91 | 46.22 | 46.36 |
| 滨海 | 220 | 44.06 | 43.6 | 42.88 | 51.81 | 55.97 | 57.81 |
| 延吉 | 220 | 43.90 | 43.31 | 42.44 | 49.07 | 51.77 | 52.96 |
| 杨柳 | 220 | 42.20 | 41.74 | 41.04 | 48.66 | 52.15 | 53.7 |
| 津三 | 220 | 41.65 | 41.18 | 40.47 | 47.9 | 51.27 | 52.77 |
| 万汇 | 220 | 40.12 | 39.65 | 38.94 | 45.87 | 48.96 | 50.32 |
| 上古 | 220 | 39.94 | 39.5 | 38.83 | 46.5 | 49.31 | 50.75 |
| 津东 | 220 | 39.57 | 39.29 | 38.81 | 47.18 | 51.54 | 53.55 |

1) 静态负荷模型的短路电流计算结果为恒阻抗 > 恒电流 > 恒功率;

2) 考虑感应电动机负荷后, 各母线短路水平较采用静态模型时有所提高, 且随着感应电动机比例的增大, 短路电流逐渐增大;

3) 相对于 500 kV 母线的短路电流变化情况, 负荷模型对电气距离距负荷侧更为接近的 220 kV 母线的短路电流水平的影响更为明显。

3. 负荷模型对短路电流影响的机理研究

3.1. 静态负荷模型对短路电流计算的影响

以 IEEE-9 系统为例, 研究不同静态负荷模型对系统短路电流水平的影响。IEEE-9 系统如图 1 所示。母线 A、B、C 处均有负荷, 分别使用恒阻抗、恒电流、恒功率的负荷模型, 计算系统的短路电流水平。

IEEE-9 系统短路电流水平如图 2 所示。可见: 使用三种静态负荷模型, 系统各母线短路电流水平变化趋势一致。母线 1、2、3 距发电机较近, 短路电流水平较高, 均在 6.2 kA 以上。当使用恒阻抗负荷模型时, 短路电流水平最高; 使用恒功率负荷模型时, 短路电流水平最低; 采用恒电流模型时, 短路电流水平介于恒阻抗和恒功率模型之间。

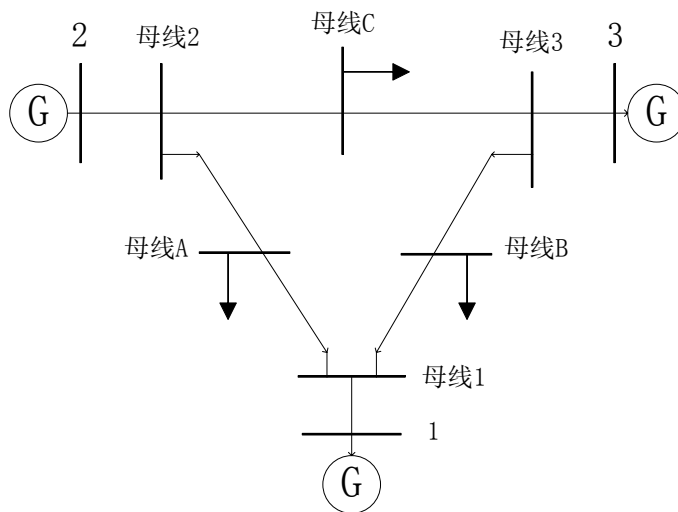


Figure 1. IEEE-9 system
图 1. IEEE-9 系统

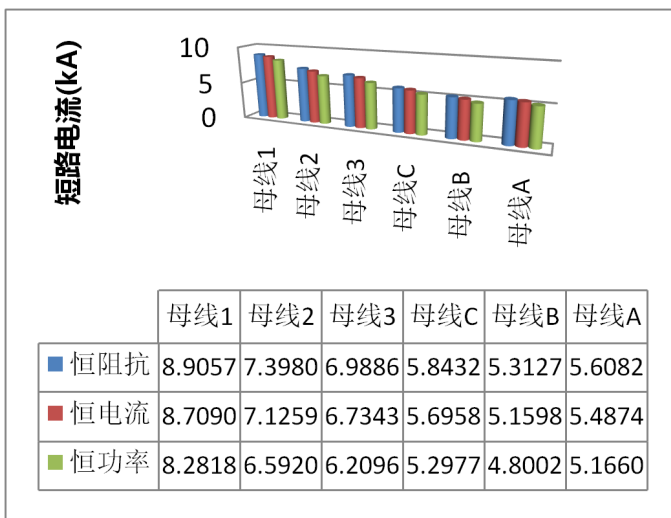


Figure 2. Short-circuit current of IEEE-9 system
图 2. IEEE-9 系统短路电流水平

静态负荷为非旋转元件，在系统发生短路时并不提供短路电流，主要起分流作用。当系统发生短路时，负荷母线电压会有不同程度的降低，因而负荷电流也会有所变化。对于恒阻抗负荷而言，由于负荷的阻抗恒定特性，当系统发生短路时，负荷母线电压会有不同程度的降低[1]，因而负荷电流也会有所变化。对于恒功率负荷而言，为保持功率的恒定，其负荷电流势必增大，分流效果更为明显。同理对于恒阻抗负荷，其负荷电流随母线电压的下降有所下降，分流能力相对较弱。

3.2. 感应电动机负荷对短路电流计算的影响

随着我国制造业的快速发展，感应电动机被广泛应用于冶金、机械制造、矿山等行业，设备的设计与应用逐渐向大型化发展。系统短路时，大容量感应电动机向短路点提供短路电流的现象越来越受到关注。

本文以单机无穷大系统为例，如图 3 所示，当母线 1 所带负荷为感应电动机负荷时，母线 A 处的短

路电流为：6.03 kA，而采用恒阻抗模型时短路电流仅为 4.06 kA，通过分析母线 1 的注入电流发现，电动机负荷向系统反馈短路电流，其周期分量初值约为 5.0 kA。因而，在系统发生短路时，感应电动机负荷可能根据具体工况向系统反馈短路电流。

本研究基于感应电动机三阶机电暂态模型[2]-[4]，推导电动机定子绕组端点三相短路解析表达式，以深入研究电动机负荷的短路反馈电流特性。为便于推导，对计算条件做以下简化：

1) 感应电动机正常运行时的转子滑差接近 0，近似认为欠激的同步发电机

正常运行的电动机转子滑差在 2%~5% 左右，可近似视为同步运行，即角速度 $\omega^* = 1$ 。短路初期由于惯性，电动机的转速变化很小，可以近似认为转速不变。因而，电动机可以近似看作欠激的同步发电机。

2) 近似认为感应电动机的定子与转子漏抗相同

当经过坐标变换，在同一坐标系统中研究电动机时，定子绕组和转子绕组无相对运动，其间的电磁关系犹如变压器。基于上述两点简化条件，可以认为感应电动机定子绕组端点三相短路时的等值电路与电动机起动时的等值电路相同[5]如图 4 所示。电动机起动初瞬接入电网，转子尚未开始转动，转子绕组是短接的，其起动电流就是短路电流，起动电抗就是转子绕组短接时的定子侧等值电抗。因此，求解定子绕组端点三相短路电动机的解析表达式，可近似认为求解电动机的起动电流。

对于上图而言，其电路可用如下微分方程表示：

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} + R_s i_s + M \frac{di_r}{dt} = 0 \\ L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r + M \frac{di_s}{dt} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， R_s, R_r, L_s, L_r 分别为定、转子绕组的电阻和电感系数；

i_s, i_r 分别为定、转子绕组的电流； M 为定、转子绕组间的互感系数。

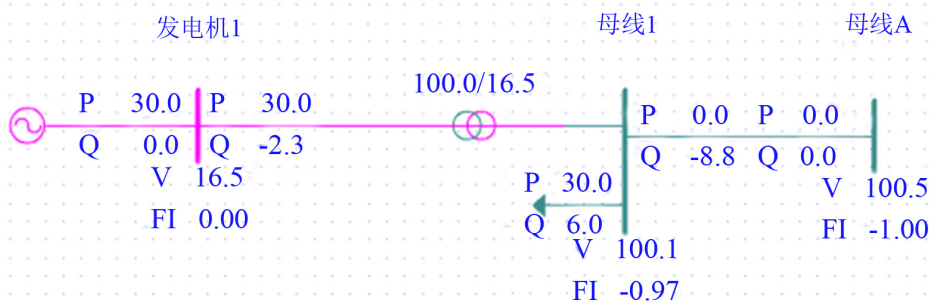


Figure 3. Infinite system of single machine

图 3. 单机无穷大系统

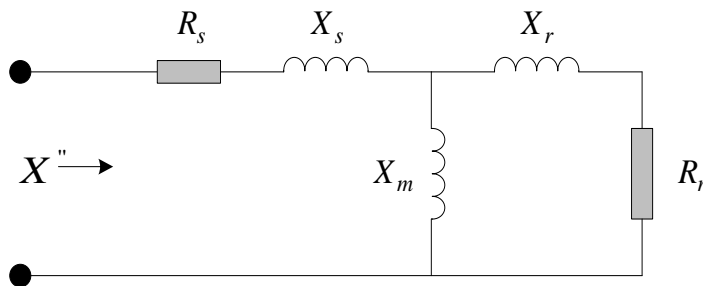


Figure 4. Equivalent circuit when induction motor starts

图 4. 感应电动机起动时的等值电路

对于方程(1)而言, 该齐次微分方程的解包括两项, 其中一项是频率接近于零的电流, 称短路电流的直流分量; 另一项是频率接近于同步频率的交流, 称短路电流的周期分量。由于短路后, 电动机无励磁电源, 两分量均为自由分量, 按照各自的时间常数衰减至零。

设电源的合闸相角为零, 并略去绕组的电阻时, 电动机反馈电流的解析表达式为:

$$i = i_d e^{-\frac{t}{T_s}} + I_k'' \cos t e^{-\frac{t}{T_r}} \quad (2)$$

式中, T_s 是转子绕组短路时定子绕组的时间常数, T_r 是定子绕组短路时转子绕组的时间常数。由于简化条件(2), 近似认为定、转子绕组的参数相同, 因而, 此处近似认为 $T_s = T_r = T_D$ 。(文献[5]经理论推导及试验研究表明: 对于绕线式、单鼠龙式、或深槽式电动机而言, 时间常数仅有一个)上式可简化为:

$$i = (i_d + I_k'' \cos t) e^{-\frac{t}{T_D}} \quad (3)$$

短路前, 正常运行状态下的电动机, 其相量图如图 5、图 6 所示。

由相量图可得: $\dot{E} = \dot{V} - j\dot{i}x''$

此处电流 \dot{i} 为定子电流周期分量有效值, 可表达为:

$$\dot{i} = -j \frac{\dot{V} - \dot{E}}{x''} \quad (4)$$

短路前瞬间 $t = 0$ 秒(用 0^- 表示), 电动机定子电流可表示为:

$$i_{0^-} = \frac{V_{0^-} - E_{0^-}''}{X_D''} \quad (5)$$

式中 V_{0^-} 和 E_{0^-} 分别为短路前电动机的端电压及次暂态电势。

短路后瞬间 $t = 0$ 秒(用 0^+ 表示)时, 电动机周期分量的初始幅值为:

$$I_k'' = -\frac{E_{0^+}''}{X_D''} \quad (6)$$

总的短路电流为:

$$i_{0^+} = i_d - \frac{E_{0^+}''}{X_D''} \quad (7)$$

根据短路前后电流不能突变的原理, 将式(5)与式(7)联立, 得

$$i_d = \frac{V_{0^-} - E_{0^-}''}{X_D''} + \frac{E_{0^+}''}{X_D''} \quad (8)$$

将式(6)、(8)代入式(2)得: $i = \left[\left(\frac{V_{0^-} - E_{0^-}''}{X_D''} + \frac{E_{0^+}''}{X_D''} \right) - \frac{E_{0^+}''}{X_D''} \cos t \right] e^{-\frac{t}{T_D}}$, 短路瞬间, 电动机的次暂态电势不发生突变, 即 $E_{0^-} = E_{0^+}$ 。因而, 上式可简写为:

$$i = \left[\frac{V_{0^-}}{X_D''} - \frac{E_{0^+}''}{X_D''} \cos t \right] e^{-\frac{t}{T_D}} \quad (9)$$

上式即为感应电动机定子绕组端点三相短路解析表达式。该解析式与电动机短路的物理概念完全吻合: 由于磁链守恒定律, 当系统发生三相短路时, 短路后瞬间感应电动机各绕组保护短路前瞬间的合成磁链不变, 绕组中将出现各种磁链和电流的自由分量, 其中定子电流将包含直流分量和同步频率交流分

量[6] [7]。如式(5)所示, 短路电流解析式中包括直流分量 $\frac{V_{0-}}{X_D''}$, 以及交流分量 $\frac{E_{0+}''}{X_D''} \cos t$ 。

对于电动机反馈短路电流而言, 较为关注其冲击电流、周期分量初值电流、以及直流分量电流。从式(5)可以看出: 电动机反馈的短路电流与次暂态电抗 X_D'' 、及衰减时间常数 T_D 密切相关。基于上述表达式, 通过分析表明, 感应电动机反馈短路电流呈如下特性:

1) 电动机反馈短路电流衰减快慢与电动机容量成正比

如图 7、图 8 所示, 大容量与小容量感应电动机其参数 R 、 X 和 T_D 各不相同, 随着电动机容量的增大, 其次暂态电抗 X_D'' 减小、时间常数 T_D 增大。通过式(5)可以看出, X_D'' 、 T_D 的变化将导致电动机反馈的冲击电流 i_p 增大、并且衰减速度减慢。对于小容量电动机, 其定子绕组端点三相短路反馈电流的峰值较小, 经历 3~4 个周波左右的时间即衰减完毕; 大容量电动机的反馈电流峰值较大, 需经历 6~8 个周波左右的时间, 其反馈电流逐渐衰减。

2) 考虑磁路饱和特性导致反馈短路电流增大

为降低感应电动机的空载电流和提高电机的功率, 气隙应尽可能小。对于中小型电动机而言, 气隙

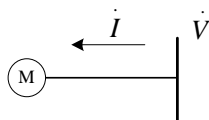


Figure 5. Node graph
图 5. 节点图

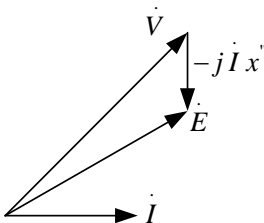


Figure 6. Phase graph
图 6. 相量图

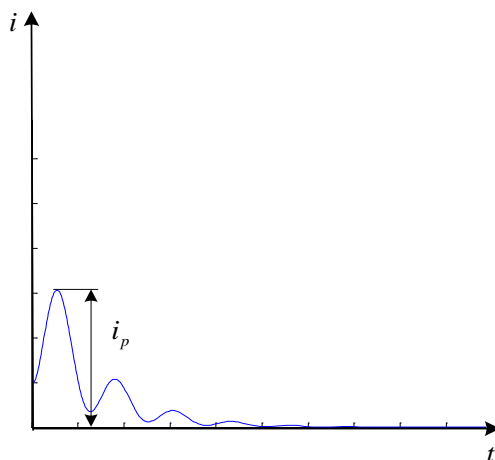


Figure 7. Feedback current waveform of small capacity induction motor
图 7. 小容量感应电动机反馈电流

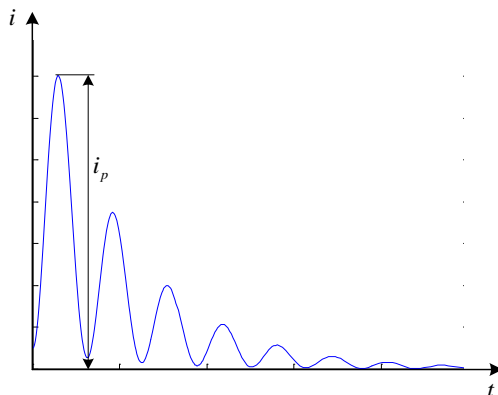


Figure 8. Feedback current waveform of large capacity induction motor
图 8. 大容量感应电动机反馈电流

一般为 0.2 mm~1.5 mm，小于发电机的气隙。在电动机反馈短路电流的计算中，基本假设忽略磁路饱和的影响，这样的假设对于中小型电动机而言是符合实际情况的。

对于大容量电动机，当电流瞬时值较大，部分漏磁被迫穿过漏磁路的铁芯部分闭合，从而使磁路饱和，饱和后的电动机次暂态电抗 X_D'' 电抗比未饱和时小得多。由式子 $I_k'' = -\frac{E_{0r}''}{X_D''}$ 可以看出，电动机短路反馈电流的周期分量初值与次暂态电抗成反比。因而，次暂态电抗的减小将造成电流的增大。对于较大容量的电动机，考虑磁路饱和特性会导致计算的反馈电流增大。

3) 并非所有电动机均提供短路电流

感应电动机作为主要的电力系统负荷，其使用功能各不相同，接入系统的电压等级也有所不同。对于大型工业负荷，电动机多接入 10 kV；对于商业、民用负荷，电动机多接入 400 V。当系统中主网的某条线路发生三相短路故障后，配电网电压的变化要经具体计算才可求得。一般而言，当配电网距主网故障点较远时，其电压变化较小。而配网中的电动机负荷是否均成为附加电源向短路点反馈短路电流，原则上是通过电动机的 E'' 和端电压 V 的相对大小来确定。

由式 $i = -j\frac{\dot{V} - \dot{E}}{x''}$ 可以看出，当短路瞬间，电动机的 $E'' > V$ ，电流 i 的方向发生变化，电动机则处于发电机状态，可视为附加电源，向短路点反馈短路电流；反之，仍处于电动机状态，不向系统反馈短路电流。故以往计算短路电流时，负荷模型中均考虑感应电动机负荷得到的计算结果较为保守。

4. 结论

1) 对于天津电网，尤其是特高压接入后的天津电网，不同负荷模型的短路电流计算结果相差较大，尤其是考虑一定比例的感应电动机负荷后，天津电网短路水平明显提高，部分 220 kV 母线的短路电流值有可能超过开关遮断容量。

2) 静态负荷模型不提供短路电流，但不同静态负荷的分流效果有所不同，总体上恒功率负荷的分流效果最为明显，恒电流负荷次之，恒阻抗负荷最差。

3) 感应电动机负荷在系统发生短路故障时提供一定的短路电流。且感应电动机反馈的短路电流大小与电动机容量成正比；考虑磁路饱和特性使得电动机反馈电流增大。

参考文献 (References)

- [1] 邱丽萍, 金小明, 林勇, 等. 负荷模型对电力系统仿真计算的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11):

87-90.

- [2] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance (1995) Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **10**, 1302-1313. <http://dx.doi.org/10.1109/59.466523>
- [3] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网的综合负荷模型. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
- [5] 西安交通大学. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [6] EL-Hawary, M.E. and Dias, L.G. (1987) Incorporation of Load Models in Load-Flow Studies: Form of Model Effects. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, **134**, 27-30. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-c.1987.0004>
- [7] Ebrahim, V., El-Din, H.M.Z. and Price, W.W. (1988) Dynamic Load Modeling in Large Scale Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, **3**, 1039-1045. <http://dx.doi.org/10.1109/59.14559>