

黑启动方案中启动厂用负荷时电压与频率的仿真校验

杨艳¹, 赵书强¹, 顾雪平¹, 杨兴宇², 魏利民²

(1. 华北电力大学电力系, 河北 保定 071003; 2. 河北电力调度通信中心, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对电力系统黑启动时, 被启动电厂厂用负荷起动过程中存在电压和频率稳定的问题, 给出了小系统各元件的详细模型, 讨论了数值仿真计算的主要方法及修正。仿真中发电机调节系统的处理, 对大型辅机启动时对小系统的冲击及带负荷时对系统频率的影响进行了数值仿真计算。通过仿真计算校验了黑启动方案的可行性。

关键词: 黑启动; 厂用电; 仿真; 电压; 频率

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0022-04

0 引言

黑启动问题的研究在我国处于起步阶段, 华东电管局以即将投产的天荒坪抽水蓄能电厂为启动电源, 对系统恢复方案进行过分析计算。2000年5月5日华北电网利用十三陵抽水蓄能电厂水电机组进行的黑启动试验在我国是首例成功的试验。随后, 浙江、陕西电力调度中心也开始了电网黑启动方案的研究。

所谓黑启动是指整个系统因故障停运后, 不依赖别的网络帮助, 通过系统中具有自启动能力的机组启动, 带动无自启动能力的机组, 逐渐扩大系统恢复范围, 最终实现整个系统的恢复。“黑启动”问题实际上就是黑启动机组经长距离黑启动路径对被启动电源母线先进行空充, 再对被启动电厂启动备用变压器进行空充, 然后逐步带上被启动电厂的厂用负荷, 启动被启动机组, 最后被启动机组与黑启动机组并网。

为保证人身及设备安全, 必须对黑启动计划进行严格认真的校验。此校验包括: 线路空载过电压校验, 发电机自励磁校验, 铁磁谐振校验, 被启动电厂厂用电启动过程中电压与频率校验, 黑启动电源与被启动电厂并列后的暂态稳定, 系统是否发生低频振荡等。本文着重研究黑启动方案中被启动电厂厂用电启动过程中电压与频率的校验。

1 被校验系统各部分模型

由于我国燃气轮机较少, 黑启动机组一般只能

选用水轮机, 因而黑启动方案多为水电厂远距离启动火电厂的情况。厂用负荷大多是各类风机、水泵等异步电动机, 所以采用异步电动机模型模拟厂用负荷。大型辅机启动时对小系统频率和电压冲击较大, 水轮机的调速器性能对小系统频率特性影响也较大, 为保证黑启动方案的顺利实施和现场试验的安全, 需要做详细的仿真研究以评估方案的可行性。设计时, 一般假设厂用母线接于无穷大系统, 和黑启动情况相差甚远, 所以工程上实用的估算启动电流的方法不再适用, 需要考虑发电机、调速器、励磁调节器、异步电机的详细模型并对此过程进行详细的仿真研究, 系统示意图如图1。

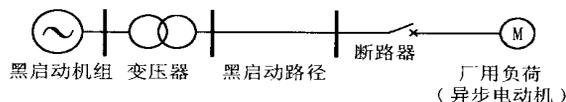


图1 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system

1.1 同步发电机模型

在目前应用比较广泛的数学模型中, 对于水轮机等凸极机, 一般在转子的直轴(d轴)和交轴(q轴)上各考虑一个等值阻尼绕组(分别为D绕组和Q绕组), 所以考虑定子侧电磁暂态过程的凸极转子(水轮)发电机的详细模型如公式(1)所示。各参数的物理意义见文献[3, 4]。

1.2 异步电动机模型

异步电动机的简化等值模型如图2所示, 其详细数学模型见公式(2)。各参数的物理意义见文献[5]。

基金项目: 国家电力公司 2002 年度重点科技项目 (SP11-2002-01-08)

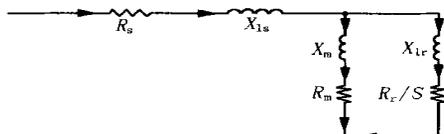


图2 异步电动机简化等值模型

Fig.2 Simplified equivalent circuit of asynchronous induction motor

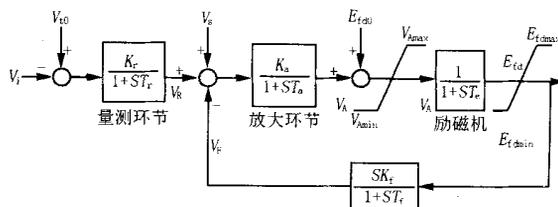


图3 发电机励磁调节系统框图

Fig.3 Block diagram of generator excitation regulating system

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} &= 0 (U_d + \quad q + R_a I_d) \\ \frac{d}{dt} &= 0 (U_q - \quad d + R_a I_q) \\ T_{d0} \frac{dE_q}{dt} &= E_{fd} - [E_q + (x_d - x_d) I_d] \\ T \frac{dE_q}{dt} &= -E_q - (x_d - x_d) I_d + E_q + T \frac{dE_q}{dt} \quad (1) \\ T \frac{dE_d}{dt} &= -E_d + (x_q - x_q) I_q \\ T_J \frac{d}{dt} &= \frac{P_m}{\omega_s} - (\quad d I_q - \quad q I_d) - D(\quad - 1) \end{aligned} \right.$$

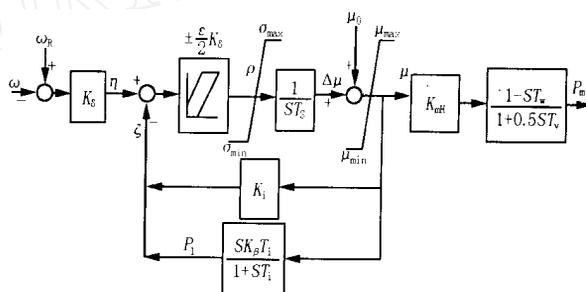


图4 原动机调速器框图

Fig.4 Block diagram of prime mover governor

$$\left\{ \begin{aligned} I_{xi} &= \sum_j (G_{ij} U_{xj} - B_{ij} U_{yj}) \\ I_{yi} &= \sum_j (G_{ij} U_{yj} + B_{ij} U_{xj}) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

2 数值仿真计算方法

列出以上各部分的微分方程式,与系统的代数方程式一起组成启动厂用电过程中的一组代数微分方程组,再利用数值算法进行求解。由于考虑了各种动态调节器动态时,系统最大时间和最小时间常数之比可能很大,因而呈现很强的刚性,所以应采用数值稳定性良好的方法。隐式梯形积分法属于单步、隐式的数值积分方法,稳定性强,对于刚性方程适应性强,是用于电力系统时域仿真的好方法。

2.1 隐式梯形积分法

对于方程 $y = f(y, t)$,若在 $[t_n, t_{n+1}]$ 区段近似认为 $y = f(y, t)$ 为直线,并以该直线下的梯形面积的 $\frac{h}{2} (y_n + y_{n+1})$ 近似于 $\int_{t_n}^{t_{n+1}} f(y, t) dt$ 的真值,则相应的通用计算公式为:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} (y_n + y_{n+1}) = y_n + \frac{h}{2} [f(y_n, t_n) + f(y_{n+1}, t_{n+1})] \quad (5)$$

再将式(5)进一步化作残差形式:

$$g = y_{n+1} - \{ y_n + \frac{h}{2} [f(y_n, t_n) + f(y_{n+1}, t_{n+1})] \} \quad (6)$$

1.3 发电机调节系统模型

发电机励磁调节系统即通常具有励磁机的励磁调节系统,由量测环节、放大环节、励磁机、反馈环节组成,如图3所示。原动机调速器模型包括量测环节、配压阀、伺服机构、反馈回路以及水锤效应、中间环节等,如图4所示。

1.4 网络方程

网络节点导纳阵方程为 $I = YU$,则第 i 号节点相应的两个实数线性代数方程为:

2.2 系统残差方程的求解

按式(5)、(6)可以将系统的微分方程组化作为以隐式梯形积分法为基础的一组残差方程。为了避免交替求解微分方程和代数方程引起的“交接误差”和迭代解法中元件和网络的接口误差,本文采用牛顿法^[3]联立求解微分方程和代数方程。另外,牛顿法对元件的非线性适应能力强,收敛性好,累计误差相对较少。

写出系统残差方程 $r = g(X) = 0$ 在 t_n 时刻的一阶泰勒展开式(下标 $n + 1$ 从略):

$$g(X) \approx g(X^{(m)}) + \frac{\partial g}{\partial X} \Big|_{X^{(m)}} (X - X^{(m)}) \quad (7)$$

则求解雅可比方程:

$$J^{(m)} X^{(m)} = r^{(m)} \quad (8)$$

得 $X^{(m)}$ 修正量,从而取

$$X^{(m+1)} = X^{(m)} - X^{(m+1)} \quad (9)$$

若 $g(X^{(m+1)}) \approx 0$, 则本时步计算收敛,否则以 $X^{(m+1)}$ 更新 $X^{(m)}$, 继续迭代,通常取 $X_{n+1}^{(0)} = X_n$, 即以前一时步的状态作为本时步状态的初估值。

2.3 仿真中的数值振荡问题

有效、高度稳定的隐式梯形积分法在网络中有断路器操作时,会使非状态变量产生不正常的摆动,这种现象称为数值振荡。由于此时非状态变量发生突变,但突变后的值难以求得,常以突变前的值代替,从而产生数值振荡。一般是将系统各元件的差分方程作适当的修正,使数值振荡在一定的时间内逐步衰减至零。事实上,后退欧拉法是一种稳定性好,又不产生数值振荡的方法,其缺点是精度较差,不宜用来计算仿真全过程。如果将梯形法与后退欧拉法按一定比例“混合”使用,使这种算法的精度介于梯形法和后退欧拉法之间,或者在断路器操作等扰动后,先用后退欧拉法计算若干步,再转入梯形法继续计算,那么数值振荡则会逐渐衰减。

2.4 调节系统的处理方法

原则上,涉及发电机励磁调节系统、调速系统时,其差分方程应与发电机方程和网络方程联立求解,但是这种解算方法实际上是难以实现的,因为从励磁调节系统和调速系统的框图可以看出,其中有很多的非线性环节,如限幅环节和死区环节,处理比较困难,所以常采用预测—校正方法,即:先对励磁

调节系统、调速系统变量进行预测,用预测值求解电机和网络方程,然后再用所得变量反推预测变量的值。若两者误差小于允许值,则认为求解正确;若误差大于允许值,则用所求预测变量的值代替预测值,重复求解,直至满足要求为止。

2.5 启动厂用负荷的数字仿真总流程
仿真总流程图,如图5所示。

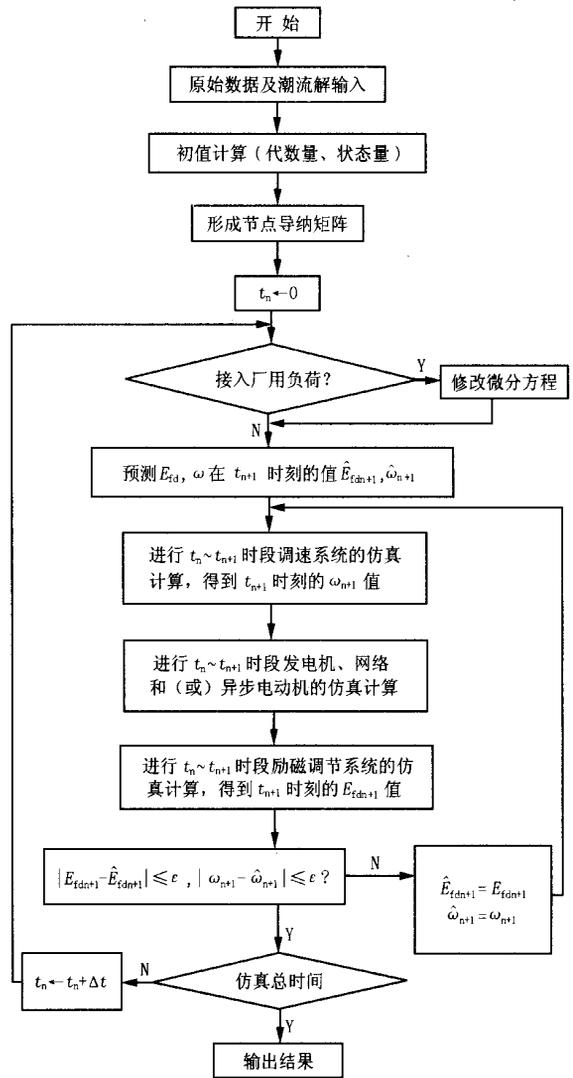


图5 启动厂用负荷的数字仿真流程图

Fig. 5 Digital simulation flow chart of starting station service load

3 仿真结果及分析

一个 170 MW 黑启动水电机组经过 100 km 的 220 kV 输电线路启动另一 160 MW 机组的厂用电。厂用负荷为 14.719 0 MW, 约占机组容量的 9.2%。仿真所需时间为 9 s, 厂用母线电压仿真曲线如图 6 所示。

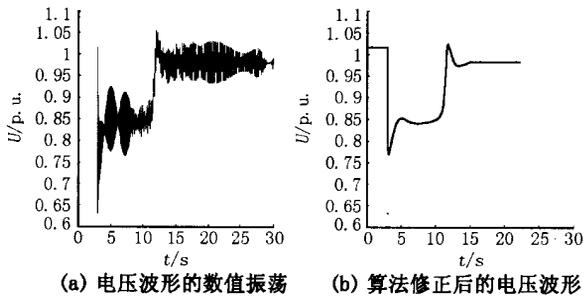


图6 启动厂用电时的厂用母线电压

Fig. 6 Station bus voltage during starting station service power

前面已经提到,虽然隐式梯形积分法具有很好的稳定性,但是会产生数值振荡现象,如图6(a)所示,厂用母线电压出现不正常的摆动。在计算方法上用后退欧拉法修正后,如图6(b)所示,数值振荡现象消失。在启动厂用电过程中,在电压最低时,比启动前下降了24.5%。

一般在电动机启动时,厂用母线的剩余电压都有一个最低限值,将仿真曲线与此限值进行比较,便可校验此方案的可行性。

系统频率仿真曲线如图7所示。图7(a)、(b)是调速器放大倍数 K 分别为20(典型值)、10时,系统频率的变化曲线。由仿真结果知,当放大倍数为典型值时,频率呈发散趋势,不收敛;而当放大倍数为10时,系统频率则很快就收敛到稳定值,可见减小调速器的放大倍数对系统频率的动态性能改善较大。因此对指定承担黑启动任务的机组,最好通过现场试验或数值仿真来整定一套黑启动方式下的调速器参数,以改善黑启动时小系统的频率调节特性。

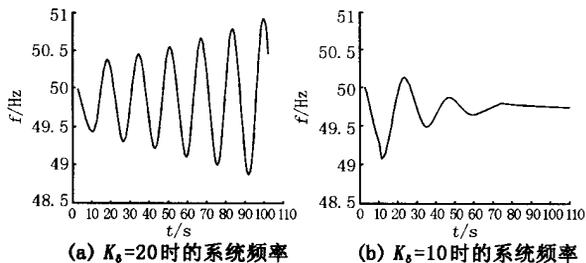


图7 厂用电启动时的系统频率

Fig. 7 System frequency during starting station service power

4 结论

本文针对电力系统黑启动方案中,被启动电厂厂用负荷恢复时,大型辅机启动对小系统频率及电

压有很大冲击的问题,详细讨论了小系统各元件模型的建立,数值计算方法的选择和修正及发电机调节系统的处理,通过对此过程的数值仿真,得到厂用电启动过程中厂用母线电压及系统频率的仿真曲线,以校验黑启动方案的可行性。

参考文献:

- [1] 周云海,闵勇,林姿峰,等(ZHOU Yur-hai, MIN Yong, LIN Zr-feng, et al). 吉林电网黑启动方案的制定及仿真(Black-start in Jilin Power Network)[J]. 中国电力(Electric Power), 2002,35(4):28-31.
- [2] 郭嘉阳,等(GUO Ji-ang, et al). 华北电网“黑启动”试验研究(Test and Research of Black Start in North China Power Network)[J]. 华北电力技术(North China Electric Power Technology), 2002,(5):3-18.
- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖(NI Yr-xin, CHEN Shour-sun, ZHANG Bao-lin). 动态电力系统的理论和分析(Theory and Analysis of Dynamic Electric Power System)[M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 2002.
- [4] 夏道止(XIA Dao-zhi). 电力系统分析(下)(Electric Power Analysis, Second Part)[M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1995.
- [5] 贺益康(HE Yr-kang). 交流电机的计算机仿真(Computer Simulation of AC Machine)[M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1990.
- [6] Lindenmeyer D, Dommel H W, Moshref A, et al. A Framework for Black Start and Power System Restoration[A]. 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. 2000, 1:153-157.
- [7] Delfino B, Denegri GB, Invernizzi M, et al. Black start and Restoration of a Part of the Italian HV Network: Modeling and Simulation of a Field Test[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1371-1379.

收稿日期: 2003-09-02; 修回日期: 2003-11-14

作者简介:

杨艳(1979-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制;

赵书强(1964-),男,博士,硕士生导师,副教授,研究方向为电力系统分析与控制,电力系统谐波分析等;

顾雪平(1964-),男,博士,博士生导师,教授,研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电力系统故障诊断和系统恢复、电力系统安全稳定和控制等。

(下转第51页 continued on page 51)

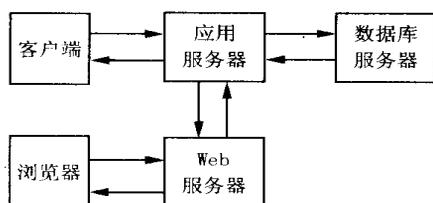


图 4 Web 模式下的多层分布式体系结构

Fig. 4 Multi-tier distributed structure in Web

户机 / 服务器结构的不足,提高了系统的稳定性、安全性,使系统更易于维护。随着信息时代和电子商务技术的发展,此种设计模式必将得到更加广泛的应用。

参考文献:

[1] 李维 (LI Wei). Delphi 5. X 分布式多层应用系统篇 (Delphi 5. X Multi-tier Distributed Application System) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing:China Machine Press) ,2000.
 [2] Steve T, Xavier P. Delphi 5 开发人员指南 (Delphi 5

Developer's Guide) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing:China Machine Press) ,2000.

[3] 张大年, 廖智勇, 刘剑锋 (ZHANG Da-nian, LIAO Zhi-Yong, LIU Jian-feng). Delphi 数据库应用开发与实例 (Delphi Database Application Developing Technology and Examples) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press) ,2002.
 [4] 曹建猷 (CAO Jian-you). 电气化铁道供电系统 (Electric Railway Power Supply System) [M]. 北京: 中国铁道出版社 (Beijing: China Railway Publishing House) ,1981.

收稿日期: 2003-08-04; 修回日期: 2003-08-30

作者简介:

桓为刚 (1975 -) ,男,硕士研究生,主要研究方向为变电站微机保护及综合自动化;
 王 (1967 -) ,男,副教授,博士,主要从事牵引供电继电保护与变电站微机保护综合自动化研究和开发工作;
 李晓航 (1973 -) ,男,讲师,硕士,主要从事软件工程与信息系统的研究和开发工作。

Application of the multi-tier distributed system in power supply management information system

HUAN Wei-gang¹, WANG Ren², LI Xiao-hang², LEI Hang-zhou³

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Computer & Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. XJ Electric Co., Ltd of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Multi-tier distributed system is the most popular framework applied in the large and medium-sized enterprises at present. In this paper, equipment management sub-system of power supply management information system is taken for an example to discuss the multi-tier distributed structure and the application in power supply management information system in detail.

Key words: multi-tier distributed framework; management information system; database

(上接第 25 页 continued from page 25)

Simulation and check of voltage and frequency during starting station service power in black-start scheme

YANG Yan¹, ZHAO Shu-qiang¹, GU Xue-ping¹, YANG Xing-yu², WEI Li-min²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In this paper, the problems of voltage and frequency stability, which exist in starting station service power in black start of power system, are studied. The models of different components in the small system are given, and main methods and coherent corrections of the numerical value simulations and calculations, and the processing methods of the generator control system are discussed in detail. And numerical value simulations and calculations have been carried out in the influence of lashing in the small system when starting large-scale auxiliary engine. The feasibility of the black-start scheme can be checked through the simulation calculation.

Key words: black start; station service power; simulation; voltage; frequency