

上海交通大學

八十七周年校庆学术报告会 论文摘要

电工及计算机科学专辑



1896—1983

上海交通大学
八十七周年校庆学术报告会论文摘要
电工及计算机科学专辑

编辑	上海交通大学科技交流室
出版	江苏省武进县村前印刷厂
印刷	

一九八三年四月出版
编号: 82643

8.0

电工及计算机科学专辑

目 录

无刷直流电动机的微处理机控制系统·····	金如麟	张慰堂	(1)
用计算机进行永磁无刷直流电动机的电磁设计·····	潭弗娃	金如麟	(3)
用乘子罚函数和海森矩阵计算最佳潮流·····	沈剑平	王祖佑	(7)
等值电网安全分析的数值试验·····	吴际舜	侯志俭	(10)
同步发电机自励磁电压计算·····	黄家裕 周景兴 岑文辉	甘庆森	(13)
傅里叶算法和微分方程算法中主要问题的分析和改进·····	张志竟 王汉忠	贺培蓉	(17)
故障检测在电力系统运动装置中的应用·····		杨冠城	(20)
电力系统紧急状态的快速校正·····		廖培鸿	(23)
用李亚普诺夫一波波夫方法估计输电系统的暂态稳定域·····	刘 笙	谢惠民	(27)
沃尔希函数在计算机型距离保护中的应用·····	郁惟镛 魏海明	陆继明	(32)
按控制系统要求设计直流伺服电机·····		吴硕麟	(36)
局部放电试验的工频高电压试验设备·····		黄镜明	(36)
用冲击电压发生器产生操作冲击电压波的若干问题·····	陈文斌	黄镜明	(37)
光电法在高电压工程中的应用概况·····	管喜康	裘东刚	(37)
在图象中滤除噪声並保留边缘信息的方法·····		林慎机	(38)
数字图象的模糊增强处理·····		施鹏飞	(39)
用模糊子集理论识别手写印刷体汉字·····		蔡国廉	(42)
一种简易的非线性边缘检测算法·····	谢式绚	华凤英	(42)
大量印刷体汉字的识别研究·····	杨文瑜	陈佩芳	(43)
控制系统计算机辅助设计技术综述·····	吴智铭	张钟俊	(43)
奇异值分解法对多变量线性系统测辨的应用·····	袁天鑫	张志湧 张钟俊	(44)
传递函数矩阵最小实现的几种不同算法的比较·····		李静如	(44)
用特征向量法测辨多变量线性定常系数的一种递推算法·····	袁天鑫 李 端	张钟俊	(45)
多变量线性定常系统解 Riecati 代数方程时权矩阵一种选择方法·····		胡文瑾	(49)
船模试验数据处理用微型计算机·····	陈铁年 范懋基 朱仲英	钟爱贞	(53)
数据处理微型机管理程序·····	朱仲英 陈铁年	范懋基	(54)
曲线拟合程序·····	范懋基 陈铁年	朱仲英	(55)
连续系统仿真语言—CSSF·····		王渝中	(56)
随机服务系统仿真模型研究·····	韩慧君 谢剑英	陈应麟	(57)
连续系统仿真语言—CSS·····		王金尧	(58)

消化系统的计算机中医辨证施治·····	谢剑英	陈应麟	(60)
数字精密调速系统·····	张 琛	赖福新	何德裕 (61)
运算放大器在电力拖动中的应用·····		祝育文	(61)
超导电机与电力推进·····		祝育文	梁翰荪 (62)
集成运算放大器的原理和应用·····		祝育文	(62)
可调螺距螺旋桨叶力矩仪的电控系统·····	张 琛	顾海粟	李月莲 (63)
降维扰动观测器在船池拖车中的应用·····	张琛	顾海粟	(64)
一个并发程序的设计·····	徐良贤	王志良	(66)
求有向图必经结点的一个有效算法·····	霍义兴	谈 明	(69)
循环程序的强验证·····	孙永强	唐保兴	(70)
适合于输出的切点处的循环不变式·····	孙永强	唐保兴	(70)
程序理论的若干新进展·····	孙永强		(71)
多次傅氏变换在图象编码压缩中的应用·····	唐保兴	王康达	(73)
多种编码汉字输入系统·····		章国英	(75)
组合式汉字库的研究·····	盛焕烨	何厚存	朱卓华 (75)
关于汉字编码方案评测准则的分析和综合·····	李公宜	何厚存	盛焕烨 (76)
硬件描述语言 CDL 及其模拟系统·····	宋云麟	周 伟	王 强 (79)
CDL Wang模拟系统在开发 LSI 中的应用·····	彭小平	宋云麟	(79)
UNIX 操作系统 Shell 解释执行器分析·····		尤晋元	(80)
学生成绩管理系统·····	何厚存	盛焕烨	丁红心 (81)
多微机系统概论·····		白英彩	(82)
采用树型结构的多微处理机计算机的体系结构·····	白英彩	夏雨人	(82)
一种树型结构的分布式计算机系统·····	白英彩		(83)
Z—80微型机的中断系统及其在控制中的应用·····	白英彩	陈兴业	(83)
微处理机的通用助记符系统·····	白英彩	陈 杰	(83)
适于多微机环境的分布式操作系统·····	白英彩	程 杰	陈兴业 (84)
微处理机的可靠性及其维护使用问题·····	白英彩		(84)
分布式操作系统的若干特点·····	白英彩	程 杰	(85)
微型机教学与通用助记符系统·····	白英彩		(85)
微处理机在多功能电传机上的应用——软件开发的总体设计思想·····	徐良贤		(86)
在微机上移植 S010操作系统探讨·····	王志良	徐良贤	(89)
微型机 BASIC—80 系统软件的开发与分析研究·····	窦延平		(91)
有限元损耗非均匀传输线的计算机辅助部分综合·····	翁行泰		(92)
对船舶磁场测量点最佳间距的论证·····	梁光璧	颜国民	范懋基 (96)
大平面磁场测量点布阵的均匀设计·····	薛理刚	颜国民	陈铁年 范懋基 (98)
数字式测磁仪·····	费仁虎	姚俊才	陈克俭 (100)
SJ—1 充磁消磁器的磁场设计·····	余晋岳	王月娟	姚俊才 屠颖刚 周炜君 (103)
弱光信息的微计算机检测和数据处理的·····	吴报鑫	张华宋	殷琢豫 (106)
在 EG3003 系统上接外设并实现中断时存在的问题及采取的措施·····	范征宇		(106)

不贯通裂纹深度测量的计算机自动修正·····方志成 廖培福 陆丽华 邱庭训	(107)
裂纹深度刻度曲线的数学模型与计算机程序·····方志成 陆丽华 程璽琦	(108)
用微型机实现不同材质表面裂纹深度测量的自动修正·····陆丽华 方志成	(109)
迴转器——一种微型化的电感·····程永萱 周德新	(109)
局部放电窄脉冲峰值测量·····方荣贵 周德新 沈义良	(110)
Z—80 O方式中断及优先权控制的实现·····吴报鑫 张华宋	(110)
一种多功能的 EPROM 写入器·····华宋 吴报鑫 赵金荣	(111)
二维递归数字滤波器的计算机辅助设计·····王家鼎 赵元良 孙文辉	(111)
三自由度前臂假手的肌电控制系统·····陈乃钧 俞际春	(112)
带微型计算机的肌电控制大腿假肢的研制·····程君实	(114)
用马克思主义的辩证法指导电路理论的教学·····林争辉	(116)
模拟电路故障诊断的定位和定值·····林争辉	(117)
模拟电路的故障诊断·····袁筱骏	(118)
应用标准基算子(SBO)分析方法分析计算线性网络大改变量响应灵敏度·····	
·····李葆芳 王 嵩	(118)
关于电路理论体系的研究·····林争辉	(119)
大规模集成电路的若干理论与设计问题·····林争辉	(120)
用新型微处理机2920构成的肌电信号处理器·····潘祖善	(121)
2920信号处理器的编程器的研制·····潘祖善	(124)
非线性振荡器频率灵敏度的一种简捷算法·····时耀中 赵元良 孙文辉	(128)
开关电容电路灵敏度分析的一种方法·····雍正正 赵元良 孙文辉	(128)
开关电容电路计算机辅助分析的一种有效方法·····雍正正 赵元良 孙文辉	(129)
开关电容滤波器设计·····雍正正 赵元良 孙文辉	(129)
使用单纯逼近和分段线性化分析解非线性电阻性网络·····李世煜 王 嵩	(130)
用系统工程方法研究我国大型港口选址问题·····王浣尘 王鹤祥 吴健中	(132)
排队网络的随机控制模型·····杨培庆	(135)
试用系统分析方法探讨科技资源的分配政策·····顾慰文	(136)

无刷直流电动机的微处理机控制系统

电工及计算机科学系 金如麟 张慰堂

一、系统结构

图1为整个控制系统的结构图。其中微型计算机部分采用 Inter 8085A 片子作为中央处理器(CPU),它和一片 2716 可擦除的只读存储器(EPROM),一片 8155 带有输入/输出转接口的随机存储器(RAM)构成一微型计算机系统,它作为无刷直流电动机的中心控制部件。其中,只读存储器容量为 2K 字节,随机存储器容量为 4K 字节。为满足本控制系统的要求,还扩充了一片 8253 可编程计数器/计时器。8253片中的三个字长十六位的减法计数器,我们分别利用它们来产生延时功能,作为基准脉冲发生器和用作转速数据编码。

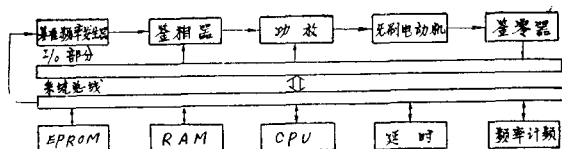


图1 系统结构图

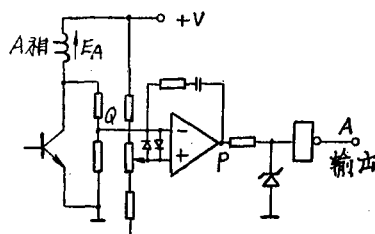


图2 鉴零器线路图

在取消位置传感器后,为保证无刷直流电动机各相绕组依转子位置而正确的换向,我们设计了绕组反电势过零鉴别器来检测转子的位置(见图2)。三个反电势鉴零器的输出反映了转子相对于三相绕组的正确位置,这是控制电机正常运行,进行数据运算,转换电机运行状态的依据。

二、系统软件设计

本控制系统用程序技术完成了一个完整的无刷直流电动机控制系统所必须的起动、转速测取、正反转控制、转向判别、制动等的全部功能,从而使控制系统的硬件支持最大限度地减少。对无传感器的无刷直流电动机的起动是一个麻烦问题,国内外学者对此作了多种尝试,迄今尚缺少理想的解决方法。我们利用微处理机的程序设计技巧,设计了几种起动方案,它们都能保证在任意大小的惯性负载下可靠地起动。

本控制程序是针对一相导通三相三状态的无刷直流电动机而设计的,稍作修改即能适用于其它类型的无刷直流电动机。全部程序约六百余条指令,占用内存 1.2K 字节。

三、控制方案综述

合理的程序设计是本系统的关键,巧妙的构思和设计的技巧可使系统程序占用的内存容

量最小,时间安排最合理,并能最大限度地减少外围硬件支持。本系统虽能达到预定的控制目的,但决不能说是最优的程序设计,还有待今后改进。图3是正常起动——运行的程序框图,各个方框完成的功能如下:

• 初始化: 包括设置堆栈指针,有关的RAM单元予置初值,指定各个I/O口和8253各计数器的工作状态并予置初值,开中断等等。

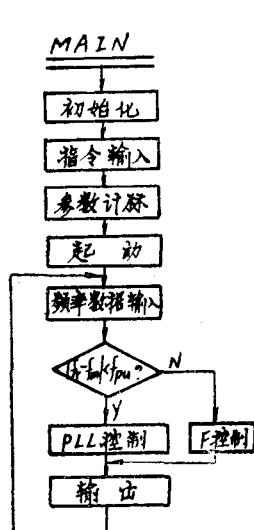


图3 主程序框图

指令输入: 以四位十六进制数的形式输入转向和转速指令。最高位表示转向(“1”表示正转,“2”表示反转),后三位表示转速指令,所能表示的最大转速指令为 $2^{12} = 4096 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$ 。例如,要求电机正向以每分钟3000转的速度旋转,则输入指令为1BB8H。

• 参数计算: 指据指令转速计算基准频率的倍数 f_r^* 值,并计算PLL控制的速度范围 $n_{PLL} = (1 \pm 25\%)n_N$,求出对应 n_{PLL} 转速的高频脉冲计算值。

• 转速频率数据输入: 8253的转速数据编码计数器的读数和重新装填。

• 转速判别: 包括转向判别,读入的频率数据判别程序,并依此决定程序流向。

• PLL控制: 发出相应的PLL运行指令。

• F控制: 转速反馈频率跟踪基准频率,使转子全导通加速或者制动。

• 输出: 包括转速频率数据滤波、延时、转速脉冲发生、发出相应的导通指令。

另外,主程序中还设有若干判断程序,以便在转子处于旋转状态时,根据输入指令,决定程序转到制动、制动一起动或维持原方向运行等等。

图4画出了电机在运行状态下一个采样周期 T (即 $\frac{1}{3}$ 转占用的时间)内的程序时间分配。

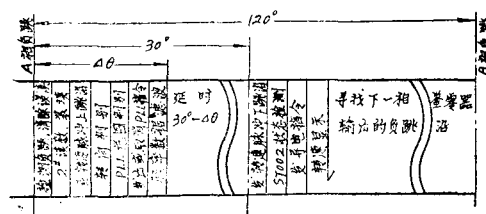


图4 程序时间分配

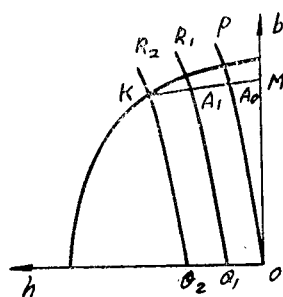
(全文已发表)

用计算机进行永磁无刷直流电动机的电磁设计

电工及计算机科学系 谭蓓娃 金如麟

永磁电机的磁路计算,不同于一般电磁式激磁电机的磁路计算,它的磁势源是永磁钢,它的计算以第Ⅱ象限的去磁曲线 $B=f(H)$ 为基础,磁钢工作点由图1磁钢工作图决定,可见影响磁钢工作点的因素很多,必须经过多次繁琐的运算,反复的凑试才能确定。另外,不同的磁钢结构和材料可获得完全不同的结果,说明永磁电机设计有很多方案可选择。

本程序框图见图2。我们用 BASIC II 语言编制源程序,并在 MIC-80 微型机上调试通过。



OP—空载工作线
Q₁R₁—负载工作线
Q₂R₂—起动时的负载工作线
K—起始工作点
A₀—空载工作点
A₁—负载工作点

图1 磁钢工作图

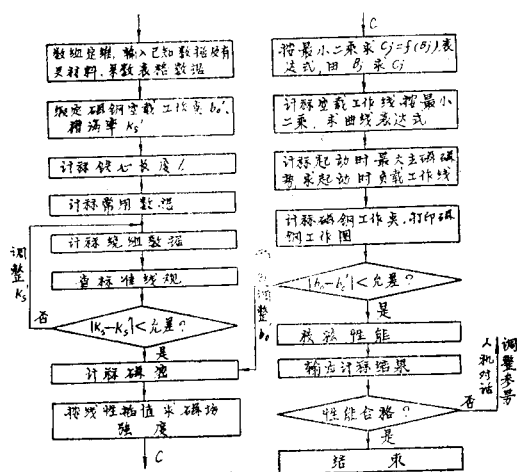


图2 无刷直流电动机设计程序框图

一、有关曲线的数学处理方法

图1中回复直线 KM 可由下式表达

$$b = b_K + (h_K - h)(1 - \alpha) \quad (1)$$

去磁曲线可表达为

$$b = \frac{1-h}{1-ah} \quad (\text{铝镍钴系磁钢}) \quad (2-a)$$

$$b = 1-h \quad (\text{稀土或铁氧体磁钢}) \quad (2-b)$$

亦可用最小二乘曲线拟合的方法得出去磁曲线或空载负载工作线的表达式。我们认为这是解决设计中许多非线性问题的好方法。对各类电机通用的曲线表格得出数学表达式后，一则使我们有条件应用对分法等等求解非线性联立方程组，二则比惯用的插值法程序简化，并节省上机时间。例如我们可用下列各式表达有关曲线、图表。

$$C_i = 0.19666 + 1.36314B_i - 0.303923B_i^2 - 2.23097B_i^3 + 2.06716B_i^4 - 0.536007B_i^5$$

(C_i 为定子轭部磁位降校正系数)

$$\text{又及 } K_z = \begin{cases} 1 - 0.01813 \left(\frac{B_L}{10000} \right)^3 & t \leq 0 \\ 0.855 - 0.2175t + 0.0251t^2 - 0.000133t^4 & t > 0 \end{cases}$$

式中 $t = (B_L - 20000)/10000$, (K_z 为起动时漏抗饱和系数, B_L 为虚构磁密)

二、磁钢起始工作点和空载、负载工作点的决定

求以上工作点, (即图 1 中的 K 、 A_0 及 A_1 点), 不难看出, 所谓求两曲线的交点, 即为求解非线性方程组。一般有迭代法, 近似解析法和对分法等三种处理方法。下面我们以求起始工作点 K 为例分述如下:

1. 近似解析法

我们以图 3 所示, 假设磁钢去磁曲线由 m 段折线组成, 令各段起始点座标为 $h(I)$, $b(I)$ 。各段直线的斜率

$$K(I) = \frac{b(I) - b(I-1)}{h(I-1) - h(I)} \quad (3)$$

则 K 点可由下列线性方程组求解

$$\begin{cases} b = b(I) - K(I) \cdot [h - h(I)] \\ b = K(h - f_m) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{解方程后得 } h = \frac{Kf_m + b(I) + K(I) \times h(I)}{K + K(I)} \quad (5)$$

用计算机求解过程如图 4。从最高段折线开始, 求取它和起动时负载工作线

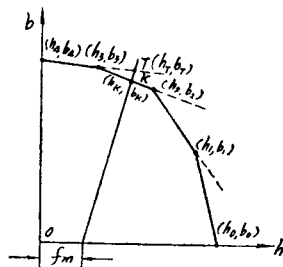


图3 近似解析法图示

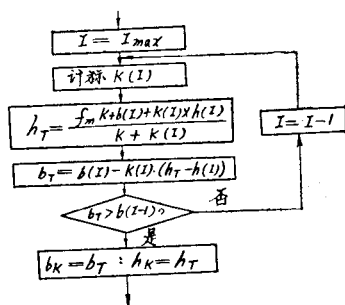


图4 近似解析法框图

$b = K(h - f_m)$ 的交点，假定交点为 $T(h_T, b_T)$ ，从图3可见，当所求得的 $b_T < b(I-1)$ 时，此交点是真正交点，依次选用下一段折线计算，直到满足条件 $b_T > b(I-1)$ 为止。

2. 对分法

用此法可以更为迅速地获得非线性方程组的解。我们仍以上述非线性方程组为例

$$\begin{cases} b = \frac{1-h}{1-\alpha h} \\ b = \frac{b+f_m K}{K} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{则} \begin{cases} h = \frac{1-b}{1-\alpha b} \\ b = \frac{b+f_m K}{K} \end{cases} \quad (7)$$

我们令

$$\phi(b) = \frac{1-b}{1-\alpha b} - \frac{b+f_m K}{K} \quad (8)$$

当 $\phi(b)$ 小于允差时，则式中的 b 值即为上述方程的解。计算机执行过程如下：以根所在区间的中点 b_m 为第一迭代点代入式(8)，若超出允差则进行第二次迭代，每次迭代都以上次迭代点为根所在区间的新端点，并舍去不包括根所在的那一随区间。不断以此原则循环迭代，直至允差达到规定的精度为止。关键是如何判断区间的取舍，若以图5的端点 b_1 和迭代介 b_m 分别代入式(8)，若所得结果符号相同，则说明真根不在此区间，可以舍去。框图6中判别框 $(h_1 - h_2) \times (h_3 - h_4) < 0$ ？即可执行上述功能。对分法实质上是一种改进了的迭代法，每经一次迭代可将根所在区间缩小一半，故在此不再累述一般的迭代法。

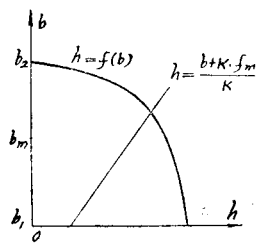


图5 对分法图示

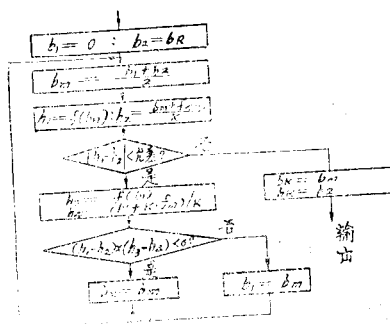


图6 对分法框图

(全文未发表)

用乘子罚函数和海森矩阵计算最佳潮流

电工及计算机科学系 沈剑平 王祖佑

非线性规划方法于 60 年代初开始应用于火电厂的经济运行计算。与经典的等微增率方法相比,这种方法具有精度高,且能考虑多种安全约束的特点。近年来有关这方面的研究发展很快,国外已有的研究成果表明,这种方法用于离线的最佳潮流计算是有效的。

从一些典型的计算来看,无约束问题的极小值,尤其是大系统多变量的问题,用海森矩阵法求解是比较有效的。对于约束条件的处理,经典的内点——外点惩罚函数法的效果不理想。已有的计算经验表明,这种方法准确的收敛依赖于罚因子 r 的值趋于无穷,但这样易引起增广目标函数海森矩阵的条件数增大,以致于矩阵病态,同时 r 值的选取对收敛性影响较大,掌握不当会过早地停留在一个次最佳点上或导致收敛失败,本文采用乘子罚函数法处理约束条件,然后用稀疏的二阶海森矩阵求解无约束问题的极小值,可以有效地避免上述罚函数的缺点。

最佳潮流问题归结为如下的形式:

$$\begin{array}{ll} \min f(x) & \\ \text{受约束于} & w_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, p \\ \text{和} & h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, q \end{array} \quad (1)$$

这里所有的函数都是二次连续可微的。当考虑 $p=q=0$ 时,这是个无约束求极值的问题。设 x^* 为极值点,由极值点的必要条件 $\Delta f(x^*) = 0$ 可以推出海森迭代公式

$$\begin{aligned} X^{K+1} &= X^K + \alpha^K H^{-1}(X^K) g(X^K) \\ &= X^K + \alpha^K \Delta X^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中 X^K 为第 K 次迭代的最优步长因子,由 $\min_{\alpha} f(X^K + \alpha \Delta X^K)$

来求得 α^K , 这是个一维变量优化问题。与其他的无约束求极值的方法相比,海森矩阵法具有迭代次数少的优点。

Sasson 等人利用电力系统中海森矩阵稀疏性的特点,首先把它成功地应用于最佳潮流计算。

乘子罚函数法与经典的惩罚函数法的区别在于它不需要增广目标函数中的控制参数趋于无穷。用乘子罚函数把式(1)的有约束问题化为无约束来处理,得到如下的增广目标函数。

$$\begin{aligned} \phi(X, \lambda, \mu, R) &= f(X) + \sum_{i=1}^p \lambda_i w_i(X) + \sum_{i=1}^p r_i w_i(X) \\ &\quad - \sum_{i=1}^q \mu_i \tilde{h}_i(X) + \sum_{i=1}^q r_i \tilde{h}_i^2(X) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式中 } \tilde{h}_j(x) = \begin{cases} h_j(x) & h_j(x) < -\frac{\mu_j}{2r_j} \\ \frac{\mu_j}{2r_j} & h_j(x) \geq -\frac{\mu_j}{2r_j} \end{cases} \quad j=1, \dots, q$$

λ 和 μ 为乘子向量, R 为罚因子向量, 可以证明, 对于充分大的罚因子 $r_i (i=1, \dots, p)$ 和 $r_j (j=1, \dots, q)$, 存在着这样的乘子向量 λ^* 和 μ^* , 使得 $\phi(X, \lambda^*, \mu^*, R)$ 的一个无约束极小值点就是原来有约束问题的解。

乘子法不依赖于罚因子趋于无穷强迫收敛, 关键问题是要找到 λ^* 和 μ^* , 一般是通过迭代法来找到的, 假定已给定了充分大的罚因子, 并设对于第 K 次迭代有估计乘子 λ^K 和 μ^K , 则由库恩—吐克条件可以得到乘子的修正公式

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i^{K+1} &= \lambda_i^K + 2r_i w_i(x) & i=1, 2, \dots, p \\ \mu_j^{K+1} &= \mu_j^K - 2r_j \tilde{h}_j(x) & j=1, 2, \dots, q \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

然后再作第 $K+1$ 次迭代

$$\min \phi(X, \lambda^{K+1}, \mu^{K+1}, R) \quad (6)$$

如果由上式求出的极值点 X^{K+1} 满足约束条件, 则相应的乘子 λ^{K+1} 和 μ^{K+1} 就是所求 λ^* 和 μ^* , 因此 X^{K+1} 也就是所寻找的解 X^* 。乘子 λ 和 μ 的初始值一般从⑪开始。第一次迭代与外点惩罚函数法形式相同。 $\min \phi(X, \text{⑪}, \text{⑪}, R)$

乘子罚函数法最早被 PoWell 等人提出用于求解等式约束问题, 后被推广到处理不等式约束问题。Fletcher 指出, 这种方法使增广目标函数无病态和奇异现象, 精度高, 速度快, 是一种有效的惩罚函数法。

用乘子法构成增广目标函数后, 用海森矩阵迭代如下:

1° 求出一个任意的潮流解 X^0 作为最佳潮流计算的初始出发点。

2° 取定罚因子的值。对乘子赋初值为 0。令 $K=0$ 。

3° 求出海森矩阵 $H(X^K)$ 和梯度向量 $g(X^K)$ 并由海森矩阵求逆得到

$$\Delta X^K = -H^{-1}(x)g(x^K)$$

4° 用三次插值的方法求最优步长因子 α^K

$$\min_{\alpha} \phi(X^K + \alpha \Delta X^K)$$

5° 令 $X^{K+1} = X^K + \alpha^K \Delta X^K$

6° 如 $\phi(X^{K+1}, \lambda^K, \mu^K, R)$ 还没有达到极小, 则转 8°

7° 令 K_d 为最大的约束违反量

$$K_d = \max_{i,j} |w_i(X^{K+1}), \min(h_j(X^{K+1}), 0)|$$

如 $K_d \leq \epsilon_d$, 则收敛停机, 输出结果。

8° 用公式(5)修正乘子并令迭代计数变量

$$K_2 = K + 1$$

然后转到 3°。

初始潮流计算可以用任意的办法。主要的计算工作量是在第 3° 步处。采用极坐标的海森元素可以同雅可比元素的组合来表出。海森矩阵是个稀疏阵, 它的稀疏性略低于牛顿潮流中的雅可比矩阵, 节点优化编号的技巧在这里仍然是适用的。海森矩阵比雅可比矩阵多了这样一些非另元素: 如节点 i 、 j 没有直接相联, 但通过第三个节点 K 相联, 在雅可比矩阵中 i 、 j 对应的是个另元素, 但在海森矩阵中却是个非另元。海森矩阵形成后, 它的求逆系采用因子分解的方法。

用本文提出的方法 5 节点、11 节点试验系统和 IEEE30 节点试验系统作了成本最小和损耗最小的计算, 所得的计算结果与其它文献中的结果作了比较。对于成本最小问题, 5 节点系统所用固定的罚因子取值范围为 500~500,000, 11 节点系统用 500~50,000。不同大小的罚因子所得的收敛结果均足满最大约束违反量小于 10^{-4} 的要求。文章中还讨论了固定罚因子取值与迭代次数之间关系。对于罚因子取收敛范围内的较小和较大的值, 所需的迭代次数要多些, 取适当范围内的一些值, 则收敛较快。

乘子罚函数和海森矩阵相结合具有可靠的收敛性, 较高的精度, 该方法在保证收敛精度的前提下收敛于罚因子的一个较宽的范围, 因此, 对所研究的系统容易选择到合适的罚因子。

(全文在中国电机工程学会的计算机在计划管理和计算机中应用学术会议上宣读)

等值电网安全分析的数值试验

电工及计算机科学系 吴际舜 侯志俭

在电力系统规划设计和在线应用方面, 进行安全分析都涉及到要对预想事故(线路开断和/或发电机开断)作出大量的潮流计算。对于大型电力系统来说, 这就要求大量的计算时间和显著的内存需量。利用静态等值将所谓的外部系统简化成外部等值, 然后利用得到的等值电网, 可以在大大减少计算时间和内存需量的情况下, 完成繁重的预想事故分析任务。

构成外部等值的主要问题, 是向内部系统提供必要的无功功率增量支援和有功功率增量支援。

I. 提供无功功率增量支援的等值方法

由于外部系统的某些节点电压, 在任何运行情况下都能近似地保持恒定, 从而当内部系统出现预想事故时, 就将向内部系统提供一定的无功功率增量支援。其方法和步骤如下:

(1) 对由外部系统和边界系统组成的导纳阵(不计所有并联支路), 用 Gauss 消去法消去所有外部节点, 从而求得边界节点间互联支路(即等值支路)的导纳。

(2) 外部系统中有源部份在某一运行条件下的作用, 可按边界匹配法用边界母线 i 处的等值注入 $P_i^{eq} + jQ_i^{eq}$ 来考虑, 即:

$$P_i^{eq} = \sum_{j \neq i} \left\{ (V_i^0)^2 (g_{ij} + g_{i0}) - V_i^0 V_j^0 (g_{ij} \cos \theta_{ij}^0 + b_{ij} \sin \theta_{ij}^0) \right\} \quad (1)$$
$$Q_i^{eq} = \sum_{j \neq i} \left\{ V_i^0 V_j^0 (b_{ij} \cos \theta_{ij}^0 - g_{ij} \sin \theta_{ij}^0) - (V_i^0)^2 (b_{ij} + b_{i0}) \right\}$$

式中 $g_{ij} + jb_{ij}$ —与边界母线 i 相联接的联络线或等值支路的线路导纳;

$g_{i0} + jb_{i0}$ —联络线在 i 侧的对地支路导纳;

V_i^0, V_j^0 —分别为基本情况下, 边界母线 i 和研究系统中邻接于 i 的母线 j 的节点电压量值;

$\theta_{ij}^0 = \theta_i^0 - \theta_j^0$ —基本情况下母线 i 和 j 间节点电压的相位差。

(3) 保留外部系统中与边界母线相邻接的各节点(称作缓冲节点)和原有的连接支路(称作缓冲支路), 构成所谓的缓冲等值。规定缓冲节点 m 为 PV 节点, 其注入有功功率 $P_m = 0$ 和节点电压等于其邻接边界母线 i 的电压, $V_m = V_i^0$ 。

II. 提供有功功率增量支援的等值方法

当内部系统出现发电机开断时, 系统频率全面降低, 如果略去系统中短暂的瞬变状态, 则系统中尚在运行的各发电机组将按其调速器的静态调差特性, 作出增加一定有功输出的响

应。为此在按 I 所述的方法构成等值电网后, 各边界节点处还应附加有等值的有功注入来表示外部系统和边界系统中各发电机组、在出现发电机开断时所作出的有功增量响应。其构成方法如下:

由于各发电机组的有功出力发生了偏离于基本情况的变化 $[\Delta P]$, 就将使系统中各节点电压出现了偏离于基本情况的 $[\Delta \theta]$ 的附加变化。且具有如下的线性关系:

$$[\Delta P = \text{diag}[V][B']\text{diag}[V][\Delta \theta] \triangleq [A][\Delta \theta] \quad (2)$$

式中: $[B']$ —DC 潮流导纳阵。

将上式按外部系统(E), 边界系统(B), 内部系统(I)分块, 可写作:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_E \\ \Delta P_B \\ \Delta P_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{EE} & A_{EB} & O \\ A_{BE} & A_{BB} & A_{BI} \\ O & A_{IB} & A_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_E \\ \Delta \theta_B \\ \Delta \theta_I \end{pmatrix} \quad (3)$$

消去式(3)中的外部变量 $\Delta \theta_E$ 后, 得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_B^* \\ \Delta P_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{BB}^* & A_{BI} \\ A_{IB} & A_{II} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_B \\ \Delta \theta_I \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{其中: } [\Delta P_B^*] = [\Delta P_B] - [\Delta A_{BE}][A_{EE}]^{-1}[\Delta P_E] \quad (5)$$

$$[A_{BB}^*] = [A_{BB}] - [A_{BE}][A_{EE}]^{-1}[A_{EB}] \quad (6)$$

经式(5)可以看出, 当内部系统中出现发电机开断后, 由于外部系统发电机有功出力发生了 $[\Delta P_E]$ 的变化和在边界母线处发电机的有功出力发生了 $[\Delta P_B]$ 的变化, 从而在边界母线处引起的综合有功等值注入变化就是 $[\Delta P_B^*]$ 。

根据发电机组频率响应特性(FRC)的定义, 对系统中每一发电机有:

$$K_i = -\frac{\Delta P_i}{\Delta f} = -\frac{-P_n}{\left(\frac{\Delta f}{\Delta P_i} \cdot \frac{P_n}{f_0}\right) f_0} = \frac{-P_{n*}}{s_* \cdot f_0} W_B \left[\frac{MW}{HZ} \right] \quad (7)$$

式中: $s_* = \left(-\frac{\Delta f/f_0}{\Delta P_i/P_n} \right)$ ——机组的调差系数(标么值);

$P_{n*} = P_n/W_B$ —机组的额定有功出力(标么值);

W_B —系统的基准功率。

当内部系统中的K母线因发电机开断而失去有功功率 P_{G^1} (即 $\Delta P_K = -P_{G^1}$) 后, 其余运转的发电机组都应增加出力, 且有:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^N \Delta P_j = P_{G^1} \quad (8)$$

则某一发电机 i 的出力变化为:

$$\Delta P_i = \frac{\left(\frac{\Delta P_i}{\Delta f} \right) P_G^i}{P_G^i / \Delta f} = \frac{- \left(\frac{\Delta P_i}{\Delta f} \right) P_G^i}{- \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^N \Delta P_j / \Delta f} = \frac{K_i P_G^i}{K_S - K_K} \quad (i \neq K) \quad (9)$$

式中: $K_S = \sum_{i=1}^N K_i = - \sum_{i=1}^N \Delta P_i / \Delta f$.

于是边界系统中和外部系统中的发电机组的出力变化将分别为:

$$[\Delta P_B] = \frac{P_G^i}{K_S - K_K} [K_B] \quad (10)$$

$$[\Delta P_E] = \frac{P_G^i}{K_S - K_K} [K_E] \quad (11)$$

其中: $[K_B]$ 、 $[K_E]$ 分别为边界系统、外部系统中各发电机组的 FRC 矢量。代入式(5)得:

$$[\Delta P_B^*] = \frac{P_G^i}{K_S - K_K} \{ [K_B] - [A_{BE}][A_{EE}]^{-1}[K_E] \} \quad (12)$$

由式(2)近似地取外部系统中所有母线的 $V_E \approx 1P.U.$ 则有:

$$[\Delta P_B^*] = \frac{P_G^i}{K_S - K_K} \{ [K_B] - \text{diag}[V_B][B'_{BE}][B'_{EE}]^{-1}[K_E] \} \quad (13)$$

本文利用以上所述构成外部等值的方法, 对 45 节点和 131 节点两试验系统作了等值网与未化简网的安全分析计算。从计算结果看来在计算精度上取得较满意的效果, 从而允许利用等值网来进行预想事故的研究。

从数值试验中, 可以得到如下结论:

(1) 所采用的等值方法有较好的收敛性, 尤其对于边界节点无邻接 PV 节点的系统来说, 收敛效果特别显著。

(2) 在边界节点有邻接 PV 节点情况下, 不论是线路开断或是发电机开断, 无功功率增量支援都可由内部系统自行调整解决, 并能给出极好的精度, 从而勿需再在各边界节点处增添相应的缓冲节点。相反, 在边界节点无邻接 PV 节点情况下, 虽然各种线路开断事故, 基本上可用相同的缓冲等值来给出不同的无功功率支援且得到很好的精度。但在各发电机开断的事故下, 由于所开断机组出力不同和所处地理位置不同, 若利用相同的缓冲等值, 就需对缓冲节点电压引入不同的缩减比例系数。为此, 目前最好选取 PV 节点或 PV 节点的邻接节点作为边界节点。当然, 上述的发电机开断系指开断整个电厂的所有机组, 若只开断发电厂中的一台最大出力机, 则仍有可能在不引入缩减比例系数下, 获得可接受的等值电网计算结果。

应该指出, 本文的结论系在特定的电网情况下得出的, 由于外部等值的行为有较强的系统依赖性, 因此建议对各种不同类型的电网作更多的数值试验工作。

(全文未发表)