

PROCEEDING
CUS-EPSSA
1985

800342

503

18084; 3

全国高等学校
电力系统及其自动化专业
第一届学术年会论文集



西安交通大学出版社

84; 3

**全国高等学校
电力系统及其自动化专业
第一届学术年会论文集**

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本论文集搜集了1985年11月16日在天津大学召开的“全国高等学校电力系统及其自动化专业第一届学术年会”上宣读讨论和交流的论文全文33篇和论文摘要48篇。这些论文和摘要比较全面地涉及到电力系统稳态和暂态分析、电力系统运行、电力系统计算机在线应用、电力系统规划和可靠性、高压直流输电、电力系统继电保护和自动控制等各个方面。他们紧密结合当前我国电力建设和国际上关注的问题，反映了我国高等学校本专业科学研究成果。

本论文集对于高等学校电力系统及其自动化专业教师、大学高年级学生和研究生进行教学和科学研究工作来说，是一本很有价值的参考资料，并可供电力部门从事设计、运行及科学研究的工程技术人员和研究人员作参考。

全国高等学校电力系统及其自动化专业第一届学术年会论文集

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安市前进印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张：15.5 字数：375千字

印数1—2,600册

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

统一书号：15340·073 定价：3.50元

前 言

全国高等学校电力系统及其自动化专业第一届学术年会于1985年11月16日在天津大学召开，出席会议的有来自全国三十四所高等学校的有关专业和水利电力部门的有关单位的代表。

本届年会共收到学术论文九十九篇，其中六十八篇在会议上进行了宣读和讨论，其余三十一篇由于代表名额的限制或其他原因，论文作者未能到会宣读，散发给代表进行交流。所宣读和交流的论文比较全面地涉及到本专业的各个方面，其中绝大部分紧密结合当前我国电力建设和国际上所关注的本专业方面问题。在这些论文作者中，年青教师和研究生占有很大比重。所有这些，一方面反映了我国高等学校本专业科学研究工作蓬勃开展的可喜现象，另一方面也反映了年青一代进行科学研究的能力正在不断提高。这次年会的学术交流，对于促进我国科学事业的发展。对于研究生的培养工作和教学改革工作将起到重大的推动作用。

为了使这些科研成果在教学、科研和生产中发挥更广泛的作用和效益，经年会讨论决定，出版本论文集。限于人力和财力，在论文集中，部分论文刊登全文，其余论文刊登摘要。

由于部分作者未能按期寄出论文摘要或其它原因，因此本论文集中尚缺少一部分论文的摘要，少量论文全文和摘要，在整理过程中作了适当的修改和删节。由于时间仓促，对论文集中的不妥之处，敬请读者见谅。

全国高等学校电力系统及其自动化专业第一届学术年会

1986年元月

目 录

电力系统稳态分析

- 1 保留潮流方程非线性的电力系统概率潮流计算……………黄进安 吴惟静 (1)
- 2 应用支路差值解耦法消除在线潮流计算中的病态…单渊达并M·L. Gilles J. Meisel(7)
- 3 电力系统无功功率及无功功率补偿概念的剖析……………杨以涵 吴立萃 (15)
- 4 可控硅无功电源的原理与实验……………杨以涵 石新春 张一工 (21)

电力系统暂态分析

- 5 超高压远距离输电线路三相短路暂态过程新算法……………方富洪 陈炳新 (27)
- 6 再论分布参数多相输电线电磁暂态行波的解析分析……………陈兢克 (34)
- 7 考虑励磁电压控制时二轴机系统李雅普诺夫函数构成及稳定评价…王仁洲 杨以涵(41)
- 8 超高压长距离输电线故障暂态过程多节网动态模型误差分析……………郑希兰 (49)
- 9 用于电力系统长时间动态行为模拟的负荷特性……………贺仁睦 (54)
- 10 相关发电机群的识别……………赵国刚 余贻鑫 (59)
- 11 李雅普诺夫直接法用于电力系统稳定性分析中的回顾与前瞻……………邵洪洋 (67)
- 12 同步电机运行方式分析中综合相量概念的应用和电路参数的计算…黄家裕 岑文辉(74)
- 13 模型辨识法任意时间短路电流计算……………李光熹 (82)
- 14 在电力系统暂态稳定研究中能量函数直接法的保守性及其修正方法……………陈礼义 (88)
- 15 电力系统机—网暂态数字仿真模型——全系统状态空间方程模型…陈 珩 李乃湖(96)
- 16 汽轮发电机失磁异步运行的分析……………马大强 许小明(104)

电力系统计算机在线应用

- 17 一种有效的事故排序方法……………李树鸿 梁新平 周 胜 (114)
- 18 一种新颖的预想事故自动选择算法……………王民有 吴际舜 (119)
- 19 电流指标自动故障选择算法……………张伯民 杨年德 王世纛 孙绍先 于尔铿 (127)

- 20 电力系统状态估计误差的方差分析……………马昭彦 赵海天 全一男 (133)
- 21 电力系统状态估计的量测配置设计……………顾锦汶 (138)

电力系统优化和可靠性

- 22 用分段计算法计算发电系统F&D指标……………吴继伟 阎超 (143)
- 23 电源优化模型……………王锡凡 (148)
- 24 多域互联电力系统发电机组检修问题的迭代算法……………田青 孙启宏 (157)
- 25 电网优化规划可靠性分析的概率流法……………孙绍先 李凤玲 陈凯 (162)

高压直流输电

- 26 12脉波换流器高压直流系统的数字仿真……………张威 伍震 (171)
- 27 对HVDC系统进行静态稳定分析时直流线路的模拟方法……………周波 (178)

电力系统继电保护和自动控制

- 28 零序注入式音频负荷控制原理……………赵铭凯 (185)
- 29 TRCP(d)-1程序及其应用——支接电阻动作特性(直接法)……………陈德树 (191)
- 30 地磁暴引起的电力系统谐波及对继电保护的影响……………贺家李 陈超英 梁统珍 (196)
- 31 最优励磁调节器的性能简介及综合分析……………王仲鸿 韩英铎 崔文进 童陆园 (205)
- 32 超高压线路重合闸过程中永久故障判别方法的研究……………肖原 葛耀中 (213)
- 33 变电站电压和无功补偿的微机控制……………黄益庄 黄慎仪 (220)

论文摘要 (48篇)

保留潮流方程非线性的电力系统概率潮流计算

黄进安 吴惟静

(上海交通大学)

0 引 言

概率潮流是近几年出现的一个新的研究领域,它研究的是:用概率变量给出节点的已知条件,求解线路潮流概率参数的方法。在进行电力系统规划,电力系统可靠性分析以及电力系统安全分析时,概率潮流可以提供非常有价值的信息。

概率潮流的计算主要有两个方面的问题:

(1) 根据节点注入量的期望值和方差(若各节点间不独立,还需给定相关节点的协方差)以及离散分布节点的有关数据,求解支路潮流的期望值和方差(或标准差)。

(2) 根据节点注入量的概率分布,求解支路潮流的概率分布。

我们知道,潮流方程是非线性方程,在计算概率潮流时是不能脱离潮流方程进行的,这就给概率潮流的计算带来了很多困难。因此,研究概率潮流计算问题就归结为寻求比较好的,既精确又实用的算法问题。亦即建立较好的数学模型问题。

美国、英国、日本、加拿大等国在70年代中期就开始在电力系统分析中应用概率分析方法,1973年提出了在潮流计算中计及负荷不确定性的概率潮流计算方法。近十年来,国外在概率潮流数学模型及计算方法上有较多研究,但在数学模型及计算方法的精确性及实用性方面还有待进一步研究。国内在这方面的研究工作开展得很少。1973年由B. Borkowska首先提出了一种直流模型^[1]来求解概率潮流问题,此模型仅分析系统的有功功率,此后,R. N. Allan等把B. Borkowska的直流模型扩展为交流模型^[2-3],即不仅考虑系统的有功功率,还分析系统的无功功率;同时,J. F. Dopazo等提出了采用最小二乘法的概率潮流计算方法^[4]。以上模型都需作线性化的假设,即均为线性模型,这必然会给计算结果带来一定的误差,为了解决这一问题,M. Sobierajski提出了保留非线性的概率潮流计算方法^[5],此法需假定各节点的状态变量均为正态分布。且在求解支路潮流方差时,必须先求得状态变量的方差,计算量很大。

本文针对以往概率潮流数学模型的一些不足之处提出了一种新的概率潮流数学模型及计算方法来计算支路潮流的均值和标准差。本方法利用直角坐标表示的潮流方程,在数学模型中考虑潮流方程的非线性,精确度较线性模型有所提高;另外,在计及潮流方程非线性的同时又结合了线性化的因素,因而数学模型比较简洁,有较好的实用性。

1 保留非线性的概率潮流数学模型

1.1 状态变量的期望值

直角坐标表示的功率型潮流方程为

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \\ Q_i = \sum_{j=1}^n [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \end{cases} \quad (1-a)$$

对于PV节点,应用电压方程代替无功功率方程

$$v_i^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (1-b)$$

式中 P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率;
 e_i 和 f_i 分别为节点 i 电压的实部和虚部;
 e_j 和 f_j 分别为与节点 i 相关联的节点 j 电压的实部和虚部;
 G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳阵中元素 (i, j) 的实部和虚部。

为了讨论方便,我们将潮流方程(1)简记为

$$y = f(x) \quad (2)$$

式中 y 表示节点的注入量,即有功、无功和电压组成的列向量;
 x 表示状态变量列向量,即节点压的实部和虚部。

将方程(2)在状态变量期望值 \bar{x} 附近泰勒展开,由于方程(2)是一组二次代数方程,故可用泰勒展开的前三项精确地表示,即

$$y = f(\bar{x}) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} \bigg|_{x=\bar{x}} \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \bigg|_{x=\bar{x}} \Delta x$$

记 $J_i \triangleq \frac{\partial f_i(x)}{\partial x} \bigg|_{x=\bar{x}}$ 为 $f_i(x)$ 的雅可比矩阵;

$H_i \triangleq \frac{\partial^2 f_i(x)}{\partial x^2} \bigg|_{x=\bar{x}}$ 为 $f_i(x)$ 的海森矩阵。

则有

$$y = f(\bar{x}) + J \Delta x + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \Delta x^T H^1 \Delta x \\ \Delta x^T H^2 \Delta x \\ \vdots \\ \Delta x^T H^n \Delta x \end{pmatrix} \quad (3)$$

对(3)式两边求期望值,则有

$$y = f(\bar{x}) + \frac{1}{2} E \begin{pmatrix} \Delta x^T H^1 \Delta x \\ \Delta x^T H^2 \Delta x \\ \vdots \\ \Delta x^T H^n \Delta x \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, E 为求期望值运算符。

如果在式(4)的二阶项中 Δx 用它的线性解(即 $\Delta x = J^{-1} \Delta y$)代入,则有,

$$\bar{y} = f(\bar{x}) + \frac{1}{2} E \begin{pmatrix} (\Delta y^T J^{-1 T}) H^1 (J^{-1} \Delta y) \\ (\Delta y^T J^{-1 T}) H^2 (J^{-1} \Delta y) \\ \vdots \\ (\Delta y^T J^{-1 T}) H_n (J^{-1} \Delta y) \end{pmatrix}$$

记 $F^i \triangleq (J^{-1})^T H^i (J^{-1})$, 有

$$\bar{y} = f(\bar{x}) + \frac{1}{2} E \begin{pmatrix} \Delta y^T F^1 \Delta y \\ \Delta y^T F^2 \Delta y \\ \vdots \\ \Delta y^T F^n \Delta y \end{pmatrix} \quad (5)$$

方程(5)是非线性方程,我们可用迭代法求得状态变量 x 的期望值 \bar{x} ,即

$$\bar{y} - \frac{1}{2} E \begin{pmatrix} \Delta y^T F^{1(r)} \Delta y \\ \Delta y^T F^{2(r)} \Delta y \\ \vdots \\ \Delta y^T F^{n(r)} \Delta y \end{pmatrix} = f(\bar{x}^{r+1}) \quad (6)$$

1.2 支路潮流的期望值和方差

通过上面的计算,求得状态变量的期望值 \bar{x} 后,便可进行支路潮流期望值和方差的计算。

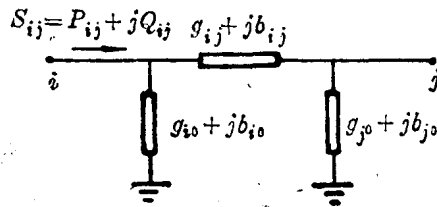


图1

如图1所示支路,其直角坐标表示的潮流方程为

$$\begin{cases} P_{ij} = (e_i^2 + f_i^2)g_{ij} - (e_i e_j + f_i f_j)g_{ij} + (e_i f_j - f_i e_j)b_{ij} + (e_i^2 + f_i^2)g_{i0} \\ Q_{ij} = -(e_i^2 + f_i^2)b_{ij} + (e_i e_j + f_i f_j)b_{ij} + (e_i f_j - e_j f_i)g_{ij} - (e_i^2 + f_i^2)b_{i0} \end{cases} \quad (7)$$

将上述方程简记为

$$z = g(\tilde{x}) \quad (8)$$

式中 Z 表示支路 $i-j$ 的有功功率 P_{ij} 和无功功率 Q_{ij} ,

\tilde{x} 为状态变量,即支路 $i-j$ 两端的电压 e_i, f_i, e_j 和 f_j 。

下面分别推导支路潮流的期望值和方差:

1.2.1 支路潮流的期望值

将式(7)在状态变量期望值 $\bar{\mathbf{x}}$ 附近展开成泰勒级数, 由于支路潮流的直角坐标表示式也是二次代数方程, 故可用泰勒展开的前三项精确地表示, 即

$$\mathbf{z} = g(\bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}} + \frac{1}{2}\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} \quad (9)$$

式式 $\mathbf{K} = \left. \frac{\partial g(\bar{\mathbf{x}})}{\partial \bar{\mathbf{x}}} \right|_{\tilde{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}}}$ 为 $g(\bar{\mathbf{x}})$ 的雅可比矩阵,

$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial^2 g(\bar{\mathbf{x}})}{\partial \bar{\mathbf{x}}^2} \right|_{\tilde{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}}}$ 为 $g(\bar{\mathbf{x}})$ 的海森矩阵

对式(9)的两边求期望值, 得

$$\bar{\mathbf{z}} = g(\bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2}E[\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}}] \quad (10)$$

同理, 在式(10)中将 $\Delta\tilde{\mathbf{x}}$ 的线性解 $\Delta\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{J}}\Delta\mathbf{y}$ 代入, 并记 $\mathbf{B} \triangleq \tilde{\mathbf{J}}^T\mathbf{A}\tilde{\mathbf{J}}$, 有

$$\bar{\mathbf{z}} = g(\bar{\mathbf{x}}) + \frac{1}{2}E[\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y}] \quad (11)$$

式(11)就是计算支路潮流期望值的表达式。

1.2.2 支路潮流的方差

对于支路潮流的方差, 有

$$\mathbf{C}_z = E[(\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}})(\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}})^T]$$

将式(9)和式(10)代入上式, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_z &= E\left[g(\bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}} + \frac{1}{2}\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - g(\bar{\mathbf{x}}) - \frac{1}{2}E(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}})\right]^2 \\ &= E\left[\mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}} + \frac{1}{2}(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - E(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}}))\right]^2 \\ &= E\left[(\mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}})^2 + \mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}}(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - E\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4}(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - E\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}})^2\right] \end{aligned}$$

将 $\Delta\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{J}}\Delta\mathbf{y}$ 代入, 并令 $\mathbf{s} = \mathbf{k}\tilde{\mathbf{J}}$, 又由于

$$E\mathbf{k}\Delta\tilde{\mathbf{x}}(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - E\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{A}\Delta\tilde{\mathbf{x}}) = E\mathbf{s}\Delta\mathbf{y}(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y} - E\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})$$

$$\begin{aligned}
&= SE\Delta\mathbf{y}(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y}) - SE\Delta\mathbf{y}(E\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y}) = SE\Delta\mathbf{y}(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y}) \\
E(\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{B}\Delta\tilde{\mathbf{x}} - E\Delta\tilde{\mathbf{x}}^T\mathbf{B}\Delta\tilde{\mathbf{x}})^2 &= E(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y} - E\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})^2 \\
&= E(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})^2 - (E\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})^2 \\
(\mathbf{S}\Delta\mathbf{y})^2 &= (\mathbf{S}\Delta\mathbf{y})(\mathbf{S}\Delta\mathbf{y}) = (\mathbf{S}\Delta\mathbf{y})^T(\mathbf{S}\Delta\mathbf{y}) = \Delta\mathbf{y}^T\mathbf{S}_z^T\mathbf{S}\Delta\mathbf{y}
\end{aligned}$$

故支路潮流方差的表示式为

$$\mathbf{C}_z = E(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{S}^T\mathbf{S}\Delta\mathbf{y}) + SE\Delta\mathbf{y}(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y}) + \frac{1}{4}E(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})^2 - \frac{1}{4}(E\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{B}\Delta\mathbf{y})^2 \quad (12)$$

式中 $\mathbf{S} = \mathbf{K}\tilde{\mathbf{J}}$ 为支路潮流的灵敏度系数矩阵。

式(12)便是计算支路潮流方差的表达式。

2 方法的计算机实现

从式(6)、式(11)和式(12)中可以看出,主要的计算量是在式(6)迭代求解状态变量的期望值。通过比较可以看到式(6)与潮流方程(2)在形式上非常相似,只是多了一个节点注入的修正量 $-\frac{1}{2}E[\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{F}^{i(r)}\Delta\mathbf{y}]$,因而在计算状态变量期望值时,我们完全可以利用解潮流方

程的程序对式(6)进行解算,从而可以精减整个计算程序。

解算具体步骤如下:

- (1) 求出一个潮流解,作为状态变量期望值的初始值 $\bar{\mathbf{x}}^{(1)}$;
- (2) 根据 $\bar{\mathbf{x}}^{(r)}$ 形成雅可比矩阵并求逆;
- (3) 计算各节点注入的修正量

$$\frac{1}{2}E[\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{F}^{i(r)}\Delta\mathbf{y}];$$

- (4) 对 $\bar{\mathbf{y}}$ 作修正形成新的节点注入

$$[\bar{\mathbf{y}}_i - \frac{1}{2}E(\Delta\mathbf{y}^T\mathbf{F}^{i(r)}\Delta\mathbf{y})]$$

重新求解潮流,得到状态变量期望值的新解 $\bar{\mathbf{x}}^{(r+1)}$;

- (5) 判断 $|\bar{\mathbf{x}}^{(r+1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(r)}| < \varepsilon$ 是否满足,若不满足回到第(2)步继续迭代,若满足则至(6);

- (6) 根据式(11)和(12)求解支路潮流的期望值和标准差。

3. 结论

用本文提出的方法对5节点, IEEE14节点和电科院22节点等几个系统进行了概率潮流计算,从计算精度,计算时间等方面对算法进行了考核,并用MONTE CARLO随机模拟验证

了计算结果。从理论分析以及和其他概率潮流数学模型比较,并从计算结果来看,我们可以得出以下结论:

(1) 本方法计及了潮流方程的非线性,精确度较线性模型有所提高。虽然在二阶项里结合了线性化的因素,这也会带来误差,但从理论上讲这只是在二阶项里结合了线性化的因素,况且在状态变量期望值的计算过程中是迭代求解的(见式(6)),迭代收敛后状态变量期望值应当比线性模型更接近真值,特别是在节点注入方差大的情况下更是如此,计算结果也证明了这一点。关于支路潮流的方差,本方法不仅要考虑节点注入的方差,还要同时计及它们的三阶矩和四阶矩(见式(12)),这比仅考虑注入方差的线性模型来说,精确度有了较大提高。

(2) 本方法对节点注入功率的概率分布无需作何限制,节点上状态变量的概率分布也可以是任意的。状态变量期望值的求解(算式(6))是独立进行的,不需和它的方差联立求解,迭代计算量不是很大。另外,支路潮流的方差仅与节点注入的方差和各阶矩有关(算式(12)),与状态变量的方差无关,这样,在计算中可以不求状态变量的方差,直接根据节点的注入的方差和各阶矩就可求得支路潮流的方差,使整个计算量大大减少,比文献[5]中提出点方法有较强的适应性,在大规模系统中实现起来比较容易。

参 考 文 献

- [1] B. Borkowska, Probabilistic Load Flow, *IEEE PES Summer Meeting* paper T73 485-0, 1973
- [2] R. N. Allan and M. R. G. AL-shakarchi, Probabilistic a. c. Load Flow, *Proc IEE*, Vol. 123, No. 6, JUNE 1976
- [3] R. N. Allan and M. R. G. AL-shakarchi Probabilistic Techniques in a. c. Load-Flow Analysis, *Proc. IEE*, Vol. 124, No. 2, FEBRUARY 1977
- [4] J. F. DoPazo et al: Stochastic Load Flow, *IEEE. Trans. PAS-94*, No. 2, 1975
- [5] M. Sobierajski, A Method of Stochastic Load Flow Calculation, *Archiv für Electrutechnik* 60(1978)37-40

应用支路差值解耦法消除在线潮流计算中的病态

单达渊 M. L. Gilles J. Meisel
(南京工学院)

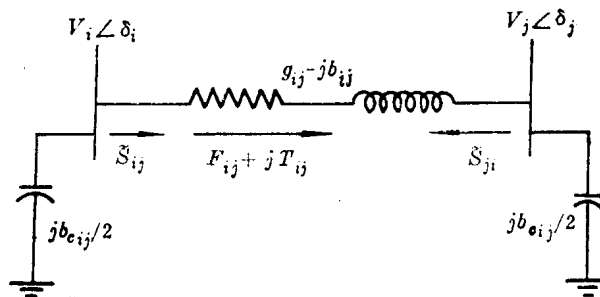
0 引言

本文给出一种新的求解潮流的算法。这种方法可以用于交流电网也可以用于求解多端交流直流混合电网。

在电力网中考虑到存在下面二个条件，即 (i) 线路二端的电压差与相角差是很小的；(ii) 线路中有功、无功损耗与输送功率相比是非常小的。应用条件 (i) 可以得到一个线性方程，计及条件 (ii) 就产生了求解潮流的静态模型。

在系统参数病态时，潮流计算的迭代次数往往会大到难以允许的程度，从而使调度中心的工作受到严重的影响。支路差值解耦法可以有效地应用于病态电网的计算。

1 线路潮流的数学模型



图一

图1为一个输电线路，在二端有接地电纳 $b_{c_{ij}}/2$ 。支路上的平均功率为

$$F_{ij} + jT_{ij} = (\tilde{S}_{ij} - S_{ji})/2 \quad (1)$$

$$F_{ij} = g_{ij} \bar{V}_{ij} U_{ij} + b_{ij} V_i V_j \sin \psi_{ij} \quad (2)$$

$$T_{i,j} = b_{i,j} \bar{V}_{i,j} U_{i,j} - g_{i,j} V_i V_j \sin \psi_{i,j}$$

式中 $\bar{V}_{i,j}$ 为线路 ij 平均电压 $(V_i + V_j) / 2$;

$U_{i,j}$ 为线路 ij 电压差 $V_i - V_j$;

$\psi_{i,j}$ 为线路 ij 的角差 $\delta_i - \delta_j$ 。

由于 $\bar{V}_{i,j} \gg U_{i,j}$ 及 $\psi_{i,j}$ 很小, 故

$$V_i V_j = \bar{V}_{i,j}^2 - U_{i,j}^2 / 4 \cong \bar{V}_{i,j}^2$$

$$\sin \psi_{i,j} \cong \psi_{i,j}$$

代入 (2)、(3) 式得出线性方程式

$$\begin{pmatrix} F_{i,j} \\ T_{i,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B''_{i,j} & G'_{i,j} \\ -G''_{i,j} & B'_{i,j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{i,j} \\ U_{i,j} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 $B''_{i,j} = b_{i,j} \bar{V}_{i,j}^2$ $G'_{i,j} = g_{i,j} \bar{V}_{i,j}$

$G''_{i,j} = g_{i,j} \bar{V}_{i,j}^2$ $B'_{i,j} = b_{i,j} \bar{V}_{i,j}$

由于 $b_{i,j}$ 通常大大超过 $g_{i,j}$, 故支路角差 $\psi_{i,j}$ 控制平均有功潮流 $F_{i,j}$, 支路平均无功 $T_{i,j}$ 则由 $\psi_{i,j}$ 与 $U_{i,j}$ 所控制。

2 潮流方程式

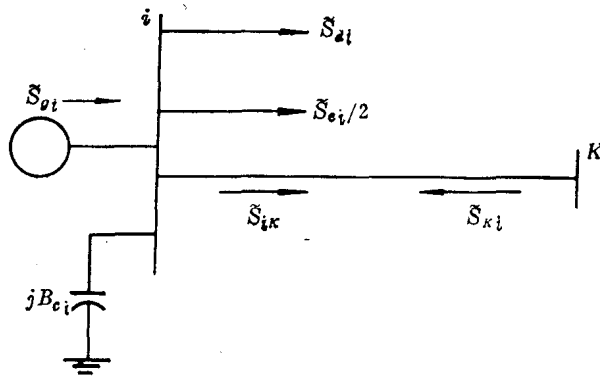


图2

图2为系统中的节点 i 。发电机注入功率 \tilde{S}_{g_i} , 负荷功率 \tilde{S}_{d_i} , B_{c_i} 为节点上接地电纳之和

$$B_{c_i} = \sum_{k \neq i} b_{c_{i,k}} / 2 \quad (7)$$

所有线路损耗均分到二端

$$\tilde{S}_{e_i} / 2 = \sum_{k \neq i} \tilde{S}_{e_{i,k}} / y \quad (8)$$

支路 ik 在 i 侧的功率为

$$\tilde{S}_{ik} = (\tilde{S}_{ik} - \tilde{S}_{ki})/2 + \tilde{S}_{eik}/2 \quad (9)$$

(1) 式代入 (9)

$$\tilde{S}_{ik} = F_{ik} + jT_{ik} + \tilde{S}_{eik}/2 \quad (10)$$

支路 ik 的电压降为 ΔV_{ik} , 则

$$\tilde{S}_{eik} = (g_{ik} + jb_{ik})\Delta V_{ik}^2 \quad (11)$$

其中 $\Delta V_{ik}^2 = U_{ik}^2 + \overline{V_{ik}^2} \psi_{ik}^2$ (12)

于是节点 i 的功率平衡方程式为

$$\tilde{S}_{gi} - \tilde{S}_{di} + jB_{ci}V_i^2 - \tilde{S}_{eik}/2 = \sum_{k \neq i} (F_{ik} + jT_{ik}) \quad (13)$$

把 (6) 代入 (13), 并略去其中 G' 项。当取节点 1 为平衡节点, 则有功、无功潮流方程式为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{m=2}^n B''_{im} \delta_m &= C_i \quad i=2, 3, \dots, n \\ \sum_{m=r+2}^n B'_{im} V_m &= D_i \quad i=r+2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $C_i = P_{gi} - P_{di} - P_{ei}/2$
 $D_i = Q_{gi} - Q_{di} + B_{ci}V_i^2 - \frac{Q_{ei}}{2} - \sum_{m=1}^{r+1} B'_{im}V_m + \sum_{m=1}^n G''_{im}\delta_m$ (15)

也可写成

$$\begin{bmatrix} B'' & 0 \\ -G'' & B' \end{bmatrix} V^{t-1} \begin{bmatrix} \delta^t \\ V^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^{t-1} \\ D^{t-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 t 为迭代次数, $D^{t-1} = D^{t-1} = D_{i-1} - [G'']V^{t-1}\delta^t$

电压加权的导纳矩阵元素为

$$G'_{ij} - jB'_{ij} = \begin{cases} \sum_{m=1}^n (g_{im} - jb_{im})V_{im} & \text{当 } i=j \\ -(g_{ij} - jb_{ij})V_{ij} & \text{当 } i \neq j \end{cases} \quad (17-a)$$

$$G''_{ij} - jB''_{ij} = \begin{cases} \sum_{m=1}^n (g_{im} - jb_{im})V_{im}^2 & \text{当 } i=j \\ -(g_{ij} - jb_{ij})V_{ij}^2 & i \neq j \end{cases} \quad (17-b)$$

式 (16)、(17) 是支路差值解耦法的基本方程式。其检查收敛条件的方程式

$$\left| \begin{aligned} \sum_{i=2}^n B''_{im} \delta_m - C_i & \leq \varepsilon_j \quad i=2, 3, \dots, n \\ \sum_{m=r+2}^n B'_{im} V_m - D_i & \leq \varepsilon_q \quad i=r+2, \dots, n \end{aligned} \right| \quad (18)$$

应用支路差值解耦法、牛顿-拉夫逊法、快速解耦法对 11、14、30、57、118 节点电网计算其收敛的迭代次数与计算速度的比较见附表 1、2。从表 1 可见支路差值解耦法的收敛速度

接近于牛顿-拉夫逊法,对网络R/X的比值敏感性小,优于快速解耦法。从表2可以看出支路差值解耦法的系数矩阵是对称解耦的,因而占用内存比牛顿法少,计算速度也快于牛顿法。但是,支路差值解耦法的系数矩阵在每次迭代时必需修正,因而每次迭代的计算时间大大超过快速解耦法,对良态的电网在总迭代次数较少时,快速解耦法的计算总时间约为支路差值解耦法的一半。

表1 收敛性比较

系统节点数	牛顿-拉夫逊法	快速解耦法	支路差值解耦法
11	3	4	3
57	3	4	3
30	3	4	3
14	3	4	3
11(R/X=1.5)	4	12	5

表2 计算时间比较(秒)

系统节点数	118	57	30
牛顿-拉夫逊法	24.99	7.89	2.85
快速解耦法	7.01	2.45	1.26
支路差值解耦法	11.73	3.3	1.8

3 线性方程组的病态识别

一组线性方程组其通常表示形式为

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (19)$$

方程组解的误差与原始解之间的关系可以用条件数来表示。在通常的计算中习惯于用谱范数的关系来表示,即

$$\text{Cond}(\mathbf{A}) = (\lambda_{\max}/\lambda_{\min})^2 \quad (20)$$

式中 λ_{\max} 为正实数,是半正定对称阵 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的最大特征值; λ_{\min} 是正实数,为 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的最小特征值。为了判断病态需计算出特征值,这一过程是复杂的。此外由于舍入误差可能使特征值是负的或复数的,因此式(20)的方法难以在工程应用中。

一种新的适用于工程应用的病态指标为

$$K(\mathbf{A}) = \left[\frac{|\text{tr}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})|}{\det(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{1/n}} \right]^{1/2} \quad (21)$$

式中 $\det(\mathbf{A}^T\mathbf{A})$ 为 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的行列式, $\text{tr}(\mathbf{A}^T\mathbf{A})$ 为 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的迹。若 $K(\mathbf{A})$ 值很大,则此时方程组(19)为病态。

4 电力系统潮流计算的病态问题

应用线性化迭代求解非线性方程组时,每次迭代的病态问题可见文献[1]、[2]、[3]。当任意次迭代 t ,系数矩阵条件数的倒数 γ^t

$$\gamma^t = \frac{1}{\text{Cond}(\mathbf{A}^t)} \quad (22)$$

均不小于某一定值时, 迭代才肯定是收敛的。

假设在初态时支路平均电压均为 1。式 (16) 的第 i, j 行为

$$-\varepsilon_{i,1}\delta^{(1)}_1 - \varepsilon_{i,2}\delta^{(1)}_2 \dots + B_{i,i}^0 \delta^{(1)}_i \dots - b_{i,j} \dots - \varepsilon_{i,n}\delta^{(1)}_n = C_i^{(0)} \quad (23-a)$$

$$-\varepsilon_{j,1}\delta^{(1)}_1 - \varepsilon_{j,2}\delta^{(1)}_2 \dots - b_{j,i} \delta^{(1)}_i \dots + B_{j,j}^0 \delta^{(1)}_j \dots - \varepsilon_{j,n}\delta^{(1)}_n = C_j^{(0)} \quad (23-b)$$

式中 $B_{i,i}^0, B_{j,j}^0$ 为 \mathbf{B}^0 阵 i 行及 j 行的对角元, $b_{i,j} = b_{j,i}$ 为支路 ij 的电纳。当支路 ij 的电纳比与其相连接的其他相邻支路的电纳大得多时, 可以看出 (23-a) 与 (23-b) 式几乎相同, 这时方程组 (16) 就是病态的。

$$K_{ij} = \max_{k \in i, l \in j} \left(\frac{b_{ik}}{b_{ij}}, \frac{b_{jl}}{b_{ij}} \right) \quad (24)$$

$k \in i$ 表示所有与节点 i 相连接的支路, $l \in j$ 表示所有与节点 j 相连接的支路。 k_{ij} 的计算需遍及所有支路, 如果 R 为一给定值, 当

$$K_{ij} < R \quad (25)$$

时, 则表示在第一次迭代时, 支路 ij 是病态灵敏元素。

5 用支路差值解耦法消除病态

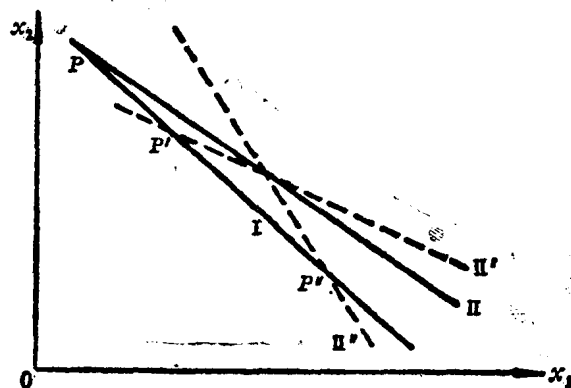


图3

图3是一个二维的简单图形。在直线 I 与 II 接近平行时, 稍许转动 I' 就会造成交点位置的很大变化。为了有效地消除病态, 且使方程组受到的扰动最小, 扰动的方向应该是使方程组中一个超平面循着另一个超平面交角增大的方向旋转。

若用 (24) 式查出灵敏元素为 $b_{i,j}$, 且 $B_{i,i}^0 < B_{j,j}^0$, 则在 $B_{i,i}^0$ 上施加一个微小的扰动增量 $\Delta B_{i,i}^0$

$$-\varepsilon_{i,1}\delta^{(1)}_1 - \dots + (B_{i,i}^0 + \Delta B_{i,i}^0)\delta^{(1)}_i \dots - b_{i,j}\delta^{(1)}_j - \dots - \varepsilon_{i,n}\delta^{(1)}_n = C_i^{(0)} + \Delta B_{i,i}^0 \delta^{(1)}_{i,adv} \quad (26)$$

式中 $\delta^{(1)}_{i,adv}$ 应取得接近于 $\delta^{(1)}$, 称为第一次迭代的平移因子。把线性方程组写成以修正量表示的形式