

浙江大学实验报告

专业：电气工程及其自动化
姓名：潘谷雨
学号：3220102382
日期：2024.10.15
地点：环科楼 305

课程名称：电力系统稳态分析 指导老师：王晓菲 成绩：
实验名称：BPA 潮流分析实验

一、实验目的和要求

- 1、复习节点电压方程、节点导纳矩阵和阻抗矩阵
- 2、从计算精度、速度方面，比较验证牛顿-拉夫逊法、P-Q 分解法等计算方法的优缺点和适用场合
- 3、设计改进迭代效率的混合迭代方法
- 4、学习 Clique 地理接线图格式潮流图程序的功能特点和使用方法，演示接线图和计算结果的对应关系

二、实验内容和原理

1. 牛顿-拉夫逊法和 P-Q 分解法应用

主流的潮流计算方法有牛顿-拉夫逊法和 P-Q 分解法。牛顿-拉夫逊法收敛性较好，但是对初值要求较高，PQ 分解法收敛速度较慢。一般先采用 PQ 分解法迭代几次，为牛顿-拉夫逊法提供较好的初值，可以解决初值问题，也可以实现收敛较快的有点。对于收敛性较差的数据，应适当增加迭代次数限制。适当调整 PQ 分解法迭代次数可以改善潮流的收敛性。

本次实验采用 IEEE300Bus.dat 潮流数据文件在三种场景下潮流计算，对结果进行比较。

2. Clique 程序调用

PSD 软件生成文件的拓扑关系如图 1.1 所示。

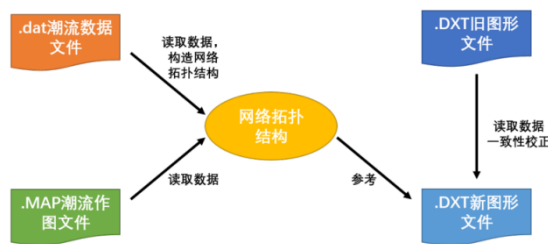


图 1.1 PSD 软件生成文件的拓扑关系

.dat 潮流数据文件包含了电力网络中节点和支路电压、电流、功率等信息，从文件中读取潮流数据，构建网络拓扑结构，描述了电力网络中各节点和支路之间的连接方式，以及它们之间的电气属性。此后读取.MAP 潮流作图文件。这个文件包含了电力网络的地理坐标或者其他相关的位置信息，有助于将电力网络的拓扑结构映射到实际地理位置上。最后，通过对.DXT 图形文件和.MAP 潮流作图文件的数据进行比较和整合，实现网络拓扑结构的一致性校正，创建一个完整的、一致的电力网络模型，用于后续的分析、规划和管理任务。

实验要求调用 Clique 程序，构建和校正网络拓扑结构，画出 14Bus 的潮流图和阻抗图。

三、主要仪器设备（系统、软件或平台）

PC 机一台、PSD 电力系统分析软件工具

四、操作方法与实验步骤

1. 打开 IEEE300Bus.dat 潮流数据文件，分别进行以下场景的潮流计算：

- (1) 只用牛顿-拉夫逊法，最多迭代次数为 30 次；
- (2) 指定计算收敛的误差：有功 0.000001，无功 0.000001（标么值）；
- (3) PQ 分解法 2 次、牛顿-拉夫逊法最多迭代 30 次。

2. 利用 Clique 程序制作基于 IEEE14Bus.dat 潮流数据文件的地理接线图，画出潮流图和阻抗图。

五、实验数据记录和处理

1. 潮流算法对比

打开 IEEE300Bus.dat 潮流数据文件，修改控制语句进行实验。

- (1) 只使用牛顿-拉夫逊法，最多迭代次数为 30 次

输入图 1.2 所示控制语句，启用潮流计算程序得到计算过程迭代信息表如图 1.3 所示。

```
/SOLUTION\  
>SOL_ITER, DECOUPLED=0, NEWTON=30<  
>TOLERANCE, AIPower=.000001, Q=.000001<  
(END)
```

图 1.2 控制语句

| | | | | | | | | | | | |
|------------|--------------|--------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|--------------|------------------------|----------------|-----------|----------|----------------|
| 潮流方式名: EMS | | 工程名: TEST | | *** 计算过程迭代信息 *** | | | | 时间: 2024-10-15 | | | |
| 300 节点 | | | | | | 409 支路 | | | | | |
| 68 | — 可调类型的节点 | | | | | 0 — 带负荷调压变压器 | | | | | |
| 0 | — 区域无功功率控制 | | | | | 0 — 直流系统 | | | | | |
| 0 | — 无功功率控制 | | | | | 0 — 理想断路器 | | | | | |
| 0 | — 可投切电容器电抗器 | | | | | | | | | | |
| 0 | — 自动发电控制单元 | | | | | | | | | | |
| 1 | — 平衡机 | | | | | | | | | | |
| ITERATION | | ABSOLUTE ERROR SUMMATION | | | | UNSOLVED | | -ADJUSTMENTS- | | JACOBIAN | |
| NO | P (P. U. MW) | Q (P. U. MVAR) | XFRMS (P. U. MVA) | AREA EXPORT (P. U. MW) | BUS VOLTAGE (P. U. KV) | BUSES | AUTO XFRMS AREAS LINES | D C | SLN TRUNC | BUS TYPE | MATRIX STORAGE |
| 1 | 480.62762 | 318.60574 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 293 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 1 | 0 0 0 0 | 0 3601 |
| 2 | 500.66763 | 42.84611 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 258 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 0 3601 |
| 3 | 502.26395 | 2.66273 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 87 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 1 3601 |
| 4 | 502.29779 | 0.10678 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 7 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 5 3601 |
| 5 | 502.29797 | 0.00694 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 1 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 1 3601 |
| 6 | 502.29813 | 0.00072 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 0 3601 |
| 7 | 502.29825 | 0.00069 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 | 0 0 0 0 | 0 3601 |
| 计算结果收敛。 | | | | | | | | | | | |

图 1.3 计算过程迭代信息表

由此可见，PQ 分解法迭代 0 次，牛顿-拉夫逊法迭代 7 次。

- (2) 在 (1) 的基础上，将计算收敛的误差调整为有功.000001，无功.000001（标么值）

输入图 1.4 所示控制语句，启用潮流计算程序得到计算过程迭代信息表如图 1.5 所示。

```
/SOLUTION\  
>SOL_ITER, DECOUPLED=0, NEWTON=30<  
>TOLERANCE, AIPower=.000001, Q=.000001<  
(END)
```

图 1.4 控制语句

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------|-------------|---------|------------------|---------|----------------|---|---|---|---|---|---|---|------|------|
| 潮流方式名: EMS | | 工程名: TEST | | *** 计算过程迭代信息 *** | | 时间: 2024-10-15 | | | | | | | | | |
| 300 节点 | | 409 支路 | | | | | | | | | | | | | |
| 68 可调类型的节点 | | 0 带负荷调压变压器 | | | | | | | | | | | | | |
| 0 区域无功功率控制 | | 0 直流系统 | | | | | | | | | | | | | |
| 0 无功负荷节点 | | 0 理想调相机 | | | | | | | | | | | | | |
| 0 可投切电容器 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 自动发电控制单元 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 平衡机 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ITERATION | | ABSOLUTE | | ERROR SUMMATION | | UNSOLVED | | | | | | | | | |
| NO | | P (P.U. MW) | | Q (P.U. MVAR) | | XFRMS | | | | | | | | | |
| | | | | | | AREA EXPORT | | | | | | | | | |
| | | | | | | BUS VOLTAGE | | | | | | | | | |
| | | | | | | BUSES | | | | | | | | | |
| | | | | | | XFRMS | | | | | | | | | |
| | | | | | | AREAS | | | | | | | | | |
| | | | | | | LINES | | | | | | | | | |
| | | | | | | D C | | | | | | | | | |
| | | | | | | SLN | | | | | | | | | |
| | | | | | | BUS | | | | | | | | | |
| | | | | | | TRUNC | | | | | | | | | |
| | | | | | | TYPE | | | | | | | | | |
| | | | | | | JACOBIAN | | | | | | | | | |
| | | | | | | MATRIX | | | | | | | | | |
| | | | | | | STORAGE | | | | | | | | | |
| 1 | 480.62762 | 318.60574 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 293 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 | |
| 2 | 500.66763 | 42.84611 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 258 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 | |
| 3 | 502.28395 | 2.45990 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 | |
| 4 | 502.29767 | 0.06747 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 | |
| 5 | 502.29788 | 0.05914 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 3601 |
| 6 | 502.29800 | 0.00080 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 |
| 7 | 502.29813 | 0.01038 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3601 |
| 8 | 502.29831 | 0.00063 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3601 |
| 计算结果收敛。 | | | | | | | | | | | | | | | |

图 1.5 计算过程迭代信息表

由此可见，PQ 分解法迭代 0 次，牛顿-拉夫逊法迭代 8 次。

(3) 在 (2) 的基础上，将潮流求解过程指定为 PQ 分解法迭代 2 次、牛顿-拉夫逊法最多迭代 30 次

输入图 1.6 所示控制语句，启用潮流计算程序得到计算过程迭代信息表如图 1.7 所示。

```
/SOLUTION\  
>SOL_ITER,DECOUPLED=2,NEWTON=30<  
>TOLERANCE, AIPOWER=.000001, Q=.000001<  
(END)|
```

图 1.6 控制语句

| | | | | | | | |
|------------|--|-------------|-----------|------------------|---------|----------------|-----|
| 潮流方式名: EMS | | 工程名: TEST | | *** 计算过程迭代信息 *** | | 时间: 2024-10-15 | |
| 300 节点 | | 409 支路 | | | | | |
| 68 可调类型的节点 | | 0 带负荷调压变压器 | | | | | |
| 0 区域无功功率控制 | | 0 直流系统 | | | | | |
| 0 无功负荷节点 | | 0 理想调相机 | | | | | |
| 0 可投切电容器 | | | | | | | |
| 0 自动发电控制单元 | | | | | | | |
| 1 平衡机 | | | | | | | |
| ITERATION | | ABSOLUTE | | ERROR SUMMATION | | UNSOLVED | |
| NO | | P (P.U. MW) | | Q (P.U. MVAR) | | XFRMS | |
| | | | | | | AREA EXPORT | |
| | | | | | | BUS VOLTAGE | |
| | | | | | | BUSES | |
| | | | | | | XFRMS | |
| | | | | | | AREAS | |
| | | | | | | LINES | |
| | | | | | | D C | |
| | | | | | | SLN | |
| | | | | | | BUS | |
| | | | | | | TRUNC | |
| | | | | | | TYPE | |
| | | | | | | JACOBIAN | |
| | | | | | | MATRIX | |
| | | | | | | STORAGE | |
| INITIAL 1 | | 480.62769 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 251 |
| INITIAL 2 | | 0.00000 | 337.59195 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 223 |
| 1 | | 92.31828 | 3.07200 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 265 |
| 2 | | 92.90755 | 0.84815 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 36 |
| 3 | | 92.91195 | 0.07870 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 4 |
| 4 | | 92.91215 | 0.02542 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 1 |
| 5 | | 92.91227 | 0.00059 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 |
| 6 | | 92.91243 | 0.00065 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0 |
| 计算结果收敛。 | | | | | | | |

图 1.7 计算过程迭代信息表

由此可见，PQ 分解法迭代 2 次，牛顿-拉夫逊法迭代 6 次。

2、Clique 程序作图

新建一个以 IEEE14Bus.dat 潮流数据文件为参考的图形文件，逐次将单个站添加到绘图区，利用控制板对连接图的潮流计算结果的显示属性进行设置。得到“潮流”图形类型如图 2.1 所示，“阻抗”图形类型如图 2.2 所示。

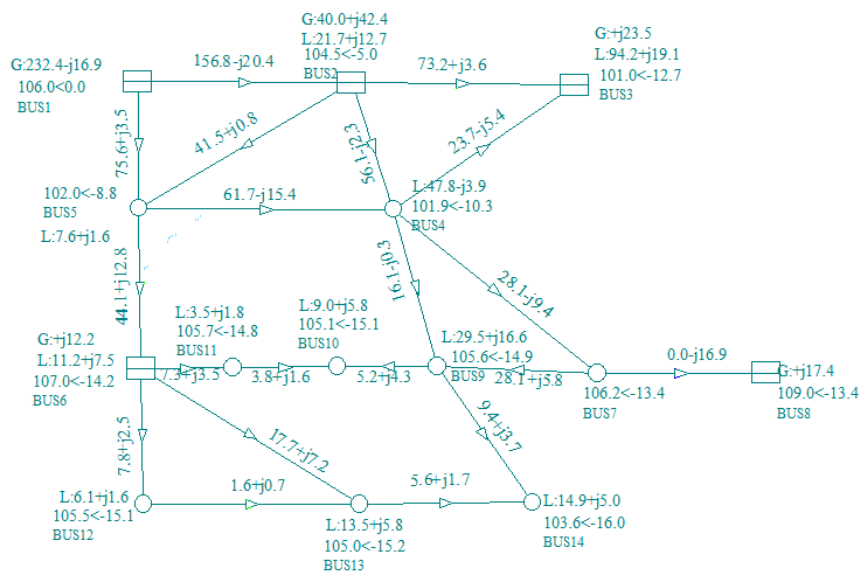


图 2.1 “潮流”图形类型

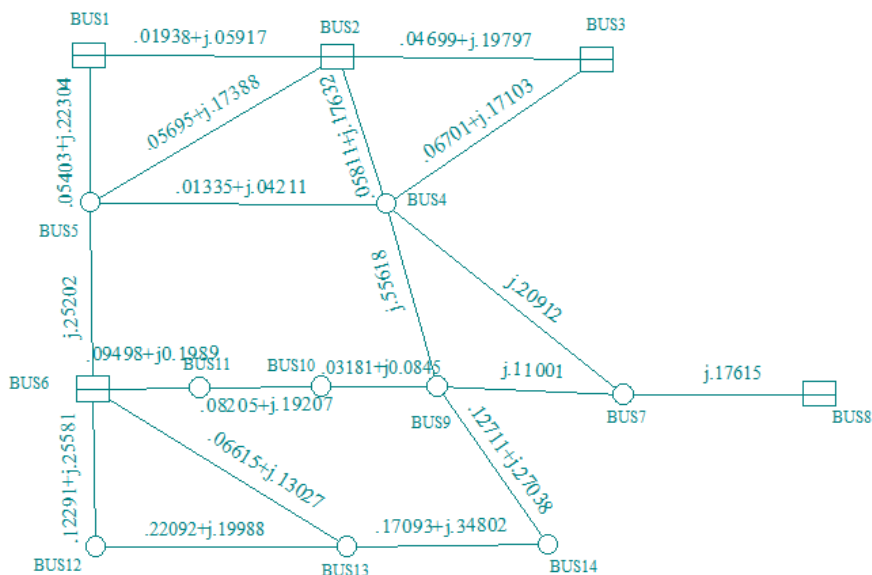


图 2.2 “阻抗”图形类型

六、分析与思考

1、电力系统潮流计算方法有哪些？其原理是什么？各有什么特点？请结合实验结果进行阐述

主流的潮流算法有牛顿-拉夫逊法和 PQ 分解法。

(1) 牛顿-拉夫逊法

首先，将潮流方程组写成 $f(x) = 0$ 的形式

$$P_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

设解的初值为 $x^{(0)}$ ，它与真值的误差为 $\Delta x^{(0)}$ ，则有 $f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = 0$ 。

将潮流方程 $f(x) = 0$ 在初值 $x^{(0)}$ 用泰勒级数展开，并略去二阶及以上的高阶项，得到

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) \approx f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} \approx 0$$

可得

$$\Delta x^{(0)} = -\frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})}$$

利用上式得到 $x^{(0)}$ 的修正量 $\Delta x^{(0)}$ ，即可得到解

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)}$$

牛顿-拉夫逊法的本质是逐次线性化，反复形成并求解修正方程直到两次

迭代解的差值 $|x^{(k+1)} - x^{(k)}|$ 小于精度限值 ε 。其迭代格式为

$$\begin{cases} \Delta x^{(k)} = -\frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \end{cases}$$

特点：牛顿-拉夫逊法的优点有收敛速度快、具有平方收敛特性、迭代次数与系统规模无关，因此可以求解大部分有病态条件的问题，并利用了保持稀疏性技术，所需内存适中。但是缺点是需要有良好的初值，并且编程复杂，计算量较大。

因此在实验中我们可以看到只采用牛顿-拉夫逊法进行 300Bus 的大规模电网潮流计算时，即使设定了高精度收敛误差，也能在 2s 以内完成计算，迭代 8 次即可收敛，内存占有量较小。

(2) PQ 分解法

PQ 分解法利用电力系统特有的以下特性，对牛顿-拉夫逊法进行简化。

- 有功主要与电压相角有关，忽略有功方程中电压幅值相关量；无功主要与电压幅值有关，忽略无功方程中电压相角相关量；
- $\cos \theta_{ij} \approx 0$ ； $G_{ij} \sin \theta_{ij} \ll B_{ij}$ ； $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$ ；
- 将牛顿-拉夫逊法系数矩阵简化为在迭代中不变的定常矩阵。

特点：PQ 分解法收敛速度较慢，一般用来在牛顿-拉夫逊法之前迭代几次，以获得较好的初值，转用牛顿-拉夫逊法。

因此我们在实验中进行了 2 次 PQ 分解后再用牛顿-拉夫逊法进行计算，获得了更好的初值，保留收敛速度快的特性。计算速度加快，迭代次数也从 8 次减小到了 6 次，改善了潮流的收敛性，实现了更加优化的迭代算法。

2、如何设计改进迭代效率的混合迭代方法？

计算过程的控制语句/SOLUTION\后跟上相应的第三季控制语句，来指定语句的具体功能。

一般情况下，首先用采用 PQ 分解法迭代几次（选取合适的数值）获得较好的初值，再转用牛顿-拉夫逊法来进行收敛速度快的迭代。

其中可以适当增大迭代次数的限制，计算收敛性较差的数据；适当调整 PQ 分解法的迭代次数，改善潮流的收敛性。此外，还可以指定计算收敛的允许误差，来减小计算的误差，但是精度过高会增加迭代次数。

因此可以设计的改进迭代效率的混合迭代方法为：PQ 分解法和牛顿-拉夫逊法相结合，根据电网特性，选取合适的迭代次数，并添加合适的收敛误差。

具体参考控制语句如下：

```
/SOLUTION\  
>SOL_ITER,DECOUPLED=,NEWTON=<  
>TOLERANCE,BUSV=,AIPOWER=,TX=,Q=,OPCUT=<
```

3、Clique 程序绘图有哪些注意事项？

Clique 地理接线图格式潮流图程序是一个电力系统分析软件的辅助工具，可以绘制地理图格式的潮流图画面，具有准自动作图、方式套用、标注数据、说明灵活多样、图形编辑等功能。有以下几点注意事项：

- (1) 生成潮流图之前，需要检查数据文件是否正确，包括站点、节点名、线路名和各种电气参数、运行模式等信息
- (2) 可以选择不同的显示方式，包括显示的标注、数据等，选择合适的图像显示，观察系统整体或局部的情况
- (3) 生成图像后，应对图像进行调整和优化，如移动数据位置、调整线路形状等，提高图像美观性和整洁性，便于更直观地观察电网
- (4) Clique 作图时，如果是新建文件，需要先运行一遍潮流计算，生成.map 文件后再作图；Clique“增加站”功能一次只能添加一个节点，需先用鼠标点中作图区域，才能弹出对话框；Clique“增加站”和标注参数时，排版随机，需手动调整一下位置。

4、实验过程中遇到哪些问题，如何解决？有哪些实验收获？

在实验过程中，虽然整体进展顺利，但在使用 Clique 绘制图表时遇到了一些挑战。主要问题是需要精心调整每个节点和数据点的位置，以避免在图像上出现数据和接线重叠，从而保证图像的清晰度和易读性。通过不断尝试和微调，最终成功解决了这一问题。

这次实验经历使我受益匪浅。我重新回顾了潮流计算的基本步骤，并深入理解了如何通过迭代方法提高计算效率；学会了如何运用控制语句来实现这一过程，更好地理解电力系统的运作机制和潮流计算的基本概念；借助 Clique 软件绘制的图表，我能更加直观地理解电力网络的连接方式和布局，这对我的学术研究非常有益。此外，我也接触并掌握了 PSD 软件的操作，这不仅提升了我的实践技能，也为未来的科研工作奠定了基础。总体来说，这次实验是一次宝贵的经验，让我在理论和实践层面都有所成长。