即将直播授课

- 下载腾讯课堂学生端APP：
  https://ke.qq.ocm/s

- 扫码进课
- 也可以看回放

- 进一次以后，下次再进课堂不需要再扫码：
  我的—最近看过—刘崇茹的课堂

- 请将昵称改为：学号姓名

第二章

电力系统故障的计算机算法

刘崇茹，教授，博导，副院长
华北电力大学电气与电子工程学院
chongru.liu@ncepu.edu.cn

课本内容安排

- 电力系统故障计算的等效网络
- 对称短路计算
- 简单不对称故障计算
- 复杂故障的计算方法

刘崇茹 chongru.liu@ncepu.edu.cn

复习稳态学过的内容

发布随堂测验4试卷

5分钟

基本假设

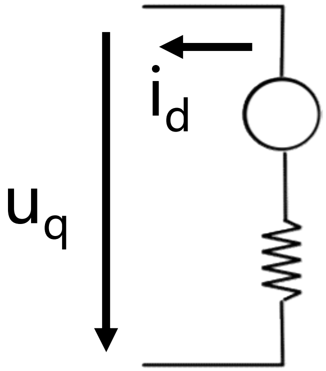
- 用计算机进行故障分析时，主要有以下两条基本假设:
  - 系统各元件的参数是恒定的，因而可以应用叠加原理
  - 除了发生不对称故障的局部以外，系统其余部分各元件的三相参数是对称的
- 系统其余部分各元件的三相参数是对称的
  - 如何理解?
  - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
  - 第二十三课 为什么对称电网可用单相网络进行分析
  - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484813

计算手段

- 利用节点方程进行计算
  - 元件模型：
    - 发电机的处理：次暂态戴维南等值电路
    - 负荷：恒阻抗模型，或忽略负荷
    - 变压器：π型等值
  - 形成节点导纳矩阵或节点阻抗矩阵
    - 生成支路阻抗矩阵
    - 生成支路导纳矩阵
    - 形成节点导纳矩阵 或 节点阻抗矩阵

元件模型

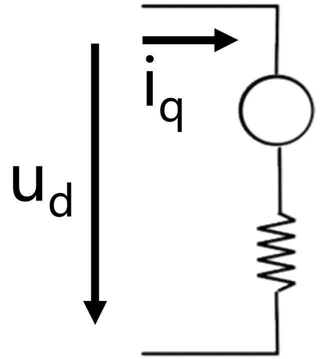
■ 发电机次暂态等值电路



$$E_q'' = x_{ad}\left(-i_d + i_f + i_D\right)$$

$$= \frac{x_{ad} // x_{D\sigma}}{x_{f\sigma} + x_{ad} // x_{D\sigma}}\psi_f + \frac{x_{ad} // x_{f\sigma}}{x_{D\sigma} + x_{ad} // x_{f\sigma}}\psi_D$$

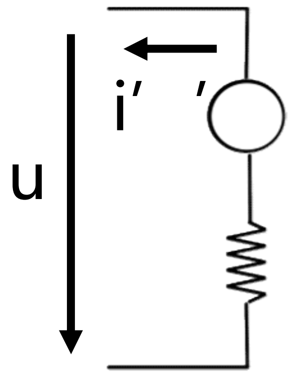
$$x_d'' = x_\sigma + x_{ad} // x_{f\sigma} // x_{D\sigma}$$



$$E_d'' = \frac{x_{aq}}{x_{Q\sigma} + x_{aq}}\psi_Q$$

$$x_q'' = x_\sigma + x_{aq} // x_{Q\sigma}$$

■ 发电机次暂态等值电路的工程近似



$$\dot{E}''_{|0|} = \dot{U}_{|0|} + \mathrm{j}\dot{I}_{|0|} X''_{\mathrm{d}}$$

$$x_d'' = x_\sigma + x_{ad} // x_{f\sigma} // x_{D\sigma}$$

虚构次暂态电动势，便于计算

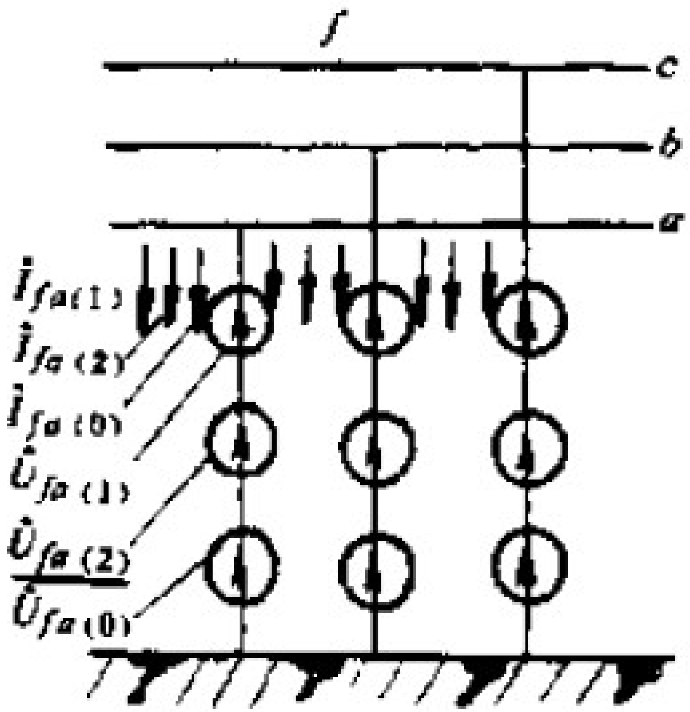
元件模型

- 负荷
  - 恒阻抗模型，数值由短路前瞬间的负荷功率和节点电压算出：$Z_L = U_L^2 / S_L^*$
  - 在简化的短路故障电流计算中，可以不计负荷电流的影响，即将负荷阻抗视为无限大

- 变压器
  - π型等值
  - 三绕组变压器视为3个双绕组变压器

故障后的网络电源

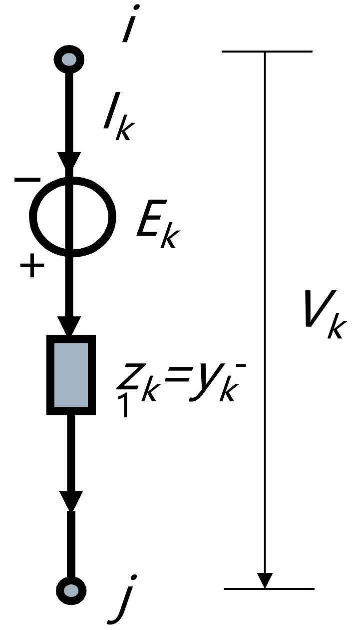
- 故障前电源
  - 只有正序
  - 没有负序零序
- 故障后电源
  - 电流源和故障电阻
  - 由边界条件决定
  - 对称故障下只有正序



- 为什么故障前系统中只有正序电源?
  - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》第二十四课 对称分量法
  - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484815

网络方程

- 原始支路特性方程
  - $U_m=Z_mI_m-E_m$
    - Z_m——支路阻抗矩阵
    - E_m——支路等值电压源
  - $I_m=Y_mU_m-J_m$
    - Y_m——支路导纳矩阵
    - J_m——支路等值电流源，$J_m=-Y_mE_m$
- 支路阻抗矩阵的形成
- 支路导纳矩阵的形成



网络方程

- 支路阻抗矩阵和支路等值电压源如何生成?
  - 支路阻抗矩阵Z_m
    - 无互感支路：对应相应位置对角元
    - 有互感的支路（通常指零序互感）：分块对角阵
    - 对阵、稀疏
  - 支路等值电压源E_m
    - 发电机支路，简化次暂态戴维南等值电路

- 既然三相网络可用单相网络描述，支路互感是如何产生的?
  - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
  - 第二十五课 元件的序参数
  - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484814

网络方程

- 支路导纳矩阵和支路等值电流源如何生成?
  - 支路导纳矩阵Y_m
    - 支路阻抗矩阵求逆：分块矩阵求逆
  - 支路等值电流源J_m
    - $J_m=-Y_mE_m$

- 节点电压方程
  - 导纳型 $I=YU$，自导纳互导纳
  - 阻抗型 $U=Y^{-1}I=ZI$，自阻抗互阻抗

网络方程

- 节点电压方程是如何得到的?
  - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
  - 第二课 电力网络的生成
  - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484758
- 导纳矩阵的修改
  - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
  - 第五课 节点导纳矩阵的修改
  - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484764

节点电压方程

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_i \\ \vdots \\ \dot{I}_j \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots Y_{1i} & \cdots Y_{1j} & \cdots Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots Y_{ii} & \cdots Y_{ij} & \cdots Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots Y_{ji} & \cdots Y_{jj} & \cdots Y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots Y_{ni} & \cdots Y_{nj} & \cdots Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_i \\ \vdots \\ \dot{U}_j \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

自导纳：第i个节点加单位电压，其他节点接地，从节点i流向网络的注入电流。

互导纳：第i个节点加单位电压，其他节点接地，从节点j流向网络的注入电流。

1) 节点导纳矩阵为对称阵、稀疏矩阵。
2) 网络结构变更时，节点导纳矩阵修改速度快、方便。
3) 在网络不变的情况下，节点导纳矩阵的结构取决于节点编号顺序。

节点导纳矩阵的形成：
(1)所有线路循环一次---追加支路法
(2)关联矩阵

节点导纳矩阵的修改：增加支路，删除支路，改变支路参数

网络方程

- 节点导纳矩阵
  - 对称性、稀疏性
    - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
    - 第四课 节点导纳矩阵的性质
    - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484763
  - 节点导纳矩阵的生成
    - 支路追加法
      - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》
      - 第三课 节点导纳矩阵的生成
      - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484759

节点电压方程

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \vdots\\ \dot{U}_i\\ \vdots\\ \dot{U}_j\\ \vdots\\ \dot{U}_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{11} & \cdots Z_{1i} & \cdots Z_{1j} & \cdots Z_{1n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ Z_{i1} & \cdots Z_{ii} & \cdots Z_{ij} & \cdots Z_{in}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ Z_{j1} & \cdots Z_{ji} & \cdots Z_{jj} & \cdots Z_{jn}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ Z_{n1} & \cdots Z_{ni} & \cdots Z_{nj} & \cdots Z_{nn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_1\\ \vdots\\ \dot{I}_i\\ \vdots\\ \dot{I}_j\\ \vdots\\ \dot{I}_n\end{bmatrix}$$

自阻抗：第i个节点加单位电流，其他节点注入电流为0，节点i的电压。也就是从i节点看进去的戴维南等效阻抗。

互阻抗：第i个节点加单位电流，其他节点注入电流为0，节点j的电压。

1) 节点阻抗矩阵为对满阵。

2) 形成节点阻抗矩阵比较困难：

(1)求逆阵，不建议。

(2)矩阵求逆辅助定理，利用节点导纳矩阵计算。

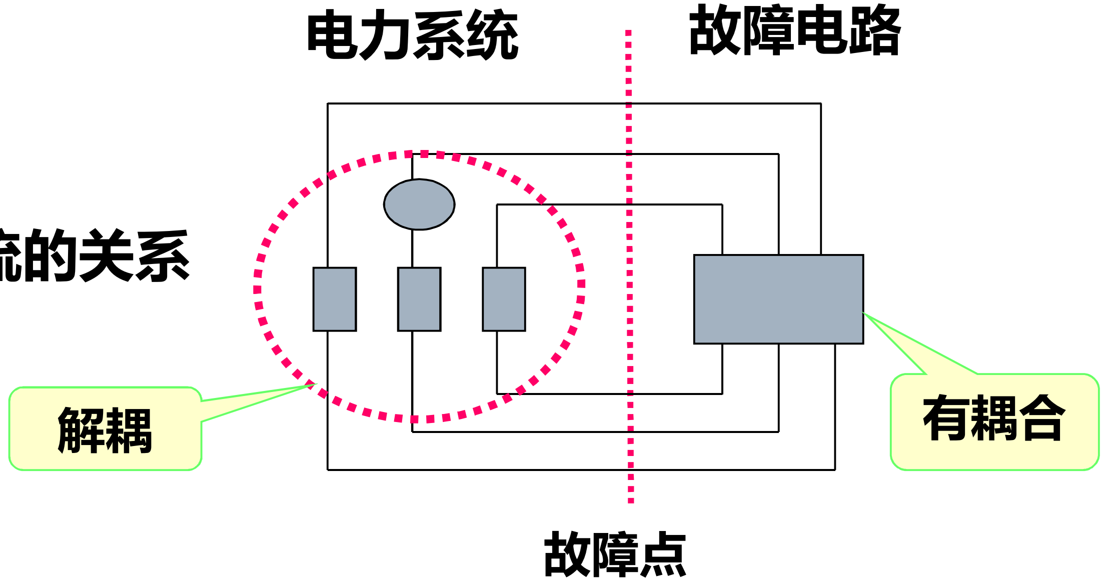
短路计算

- 应用阻抗型节点方程（U=ZI）进行求解

$$\dot{U}_{F(1)} = \dot{U}_F^{(0)} - Z_{FF(1)}\dot{I}_{F(1)}$$
$$\dot{U}_{F(2)} = -Z_{FF(2)}\dot{I}_{F(2)}$$
$$\dot{U}_{F(0)} = -Z_{FF(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

  - Z_{FF}：从故障点看进去的等值阻抗，即故障点自阻抗

- 如何求解?
  - 三个方程六个未知数
  - 寻找各序电压与序电流的关系

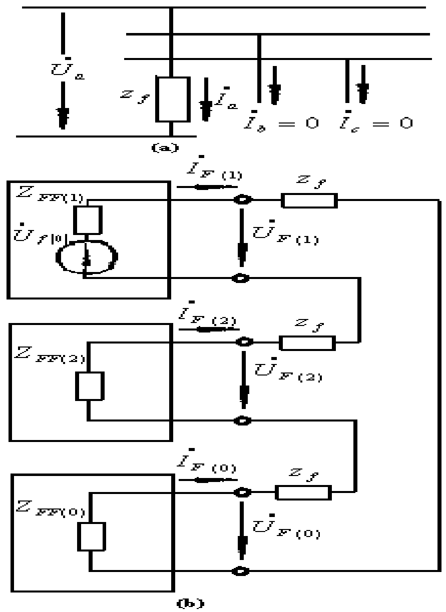


横向不对称故障

- a相接地短路——序网串联

$$\dot{I}_{F(1)} = \dot{I}_{F(2)} = \dot{I}_{F(0)}$$

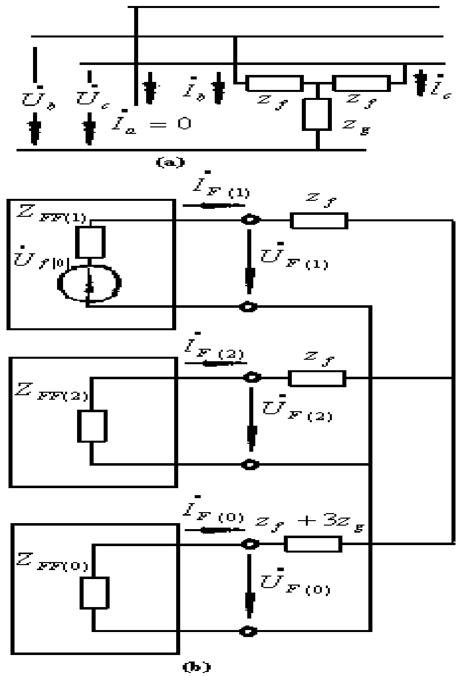
$$(\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)}) + (\dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)}) + (\dot{U}_{F(0)} - z_f \dot{I}_{F(0)}) = 0$$



- bc相短路接地——序网并联

$$\dot{I}_{F(1)} + \dot{I}_{F(2)} + \dot{I}_{F(0)} = 0$$

$$\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)} = \dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)} = \dot{U}_{F(0)} - (z_f + 3z_g)\dot{I}_{F(0)}$$



- bc相间短路——序网并联
  - z_g趋于无限大

$$\dot{I}_{F(1)} = -\dot{I}_{F(2)} = \frac{\dot{U}_{f|0|}}{Z_{FF(1)} + Z_{FF(2)} + 2z_f}$$

纵向不对称故障

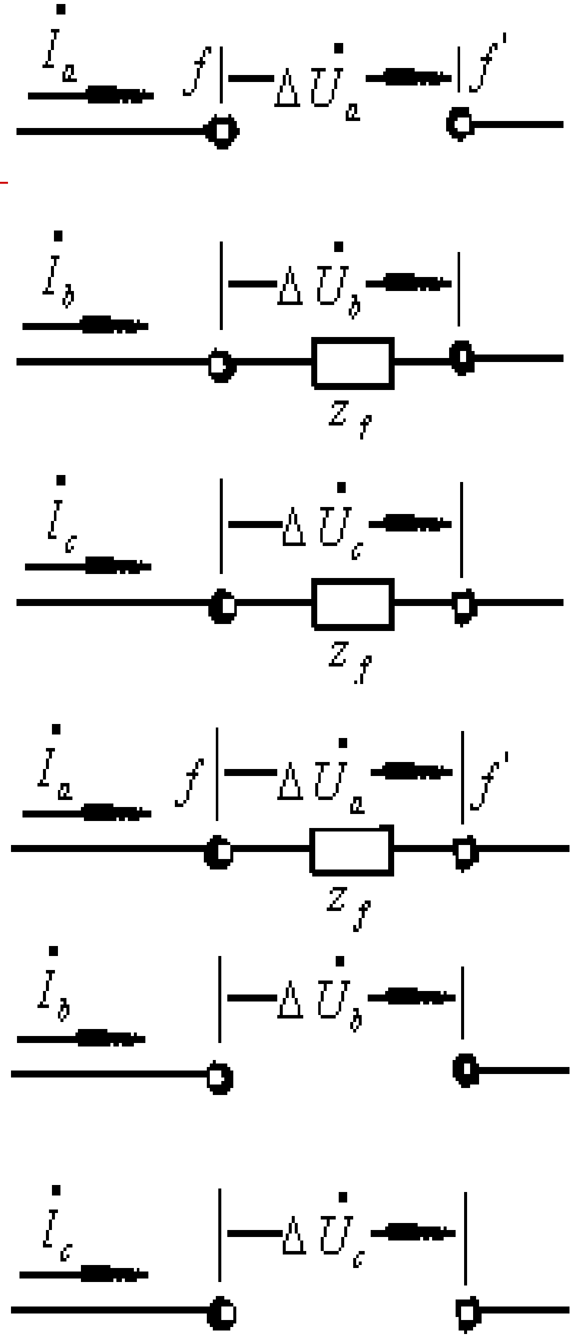
- a相断开——**序网并联**
  - 相当于bc相短路接地

$$\dot{I}_a = 0, \Delta\dot{U}_b - z_f\dot{I}_b = 0$$

$$\Delta\dot{U}_b - z_f\dot{I}_c = 0$$

- bc相断开——**序网串联**
  - 相当于a相短路接地

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0, \Delta\dot{U}_a - z_f\dot{I}_a = 0$$

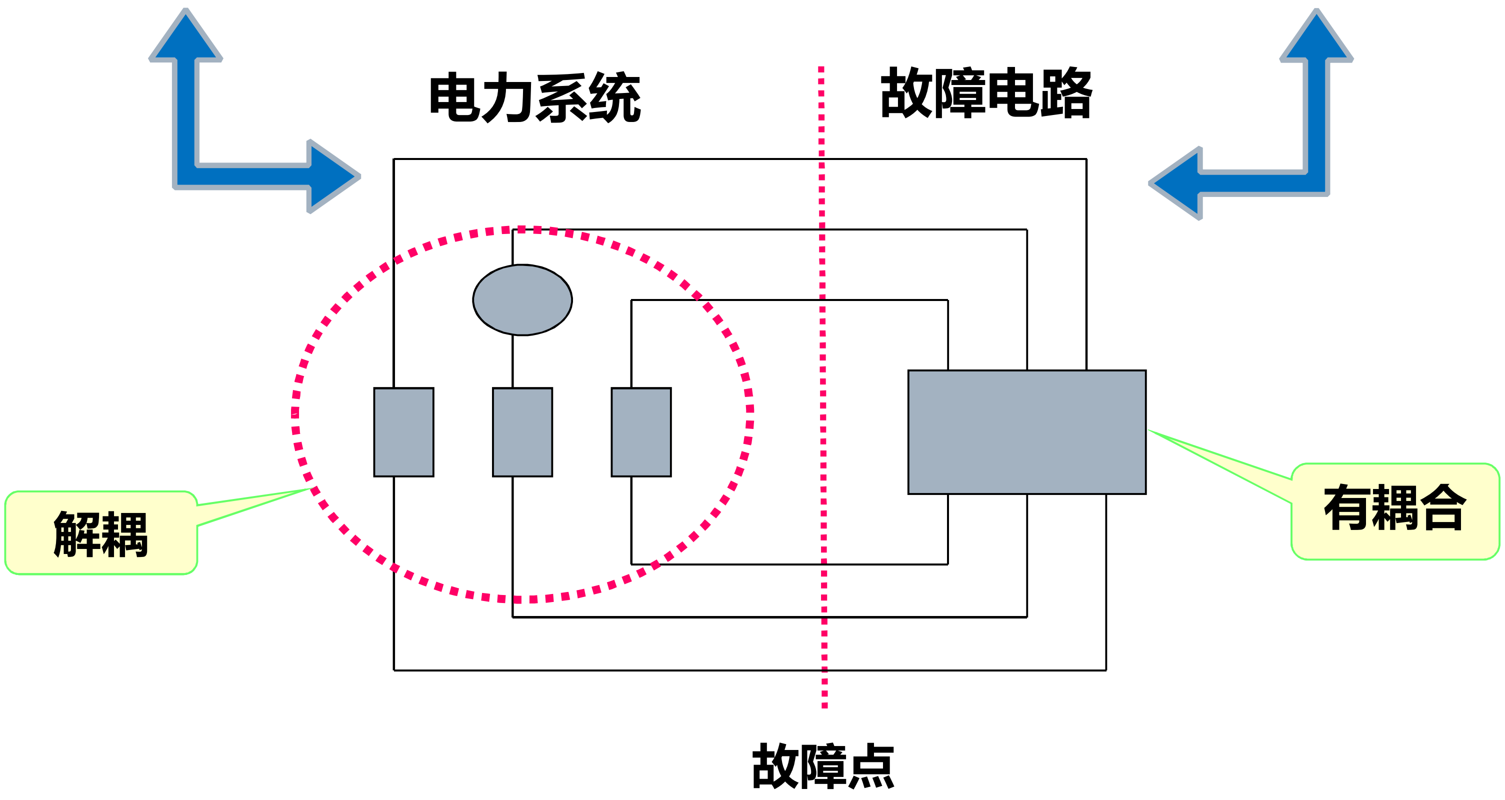


简单不对称故障

$$\dot{U}_{F(1)} = \dot{U}_F^{(0)} - Z_{FF(1)}\dot{I}_{F(1)}$$
$$\dot{U}_{F(2)} = -Z_{FF(2)}\dot{I}_{F(2)}$$
$$\dot{U}_{F(0)} = -Z_{FF(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

+

各序电压与序电流的关系
(3个方程)



简单不对称故障

$$\dot{U}_{F(1)} = \dot{U}_F^{(0)} - Z_{FF(1)}\dot{I}_{F(1)}$$
$$\dot{U}_{F(2)} = -Z_{FF(2)}\dot{I}_{F(2)}$$
$$\dot{U}_{F(0)} = -Z_{FF(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

＋ 各序电压与序电流的关系（3个方程）

6个方程，6个未知数，可解！

能不能推论到复杂故障?

每个故障点都有6个未知数，那么能不能给每个故障点都找到6个方程呢？如果能，有没有统一的数学描述形式，便于计算机求解呢?

复杂故障

- 多端口复合型故障
  - 变量个数：6N个（各端口正负零序电压和电流）
  - 列写故障点电网侧正负零序电压电流关系（3N个）

$$\dot{U}_{F(1)} = \dot{U}_F^{(0)} - Z_{FF(1)}\dot{I}_{F(1)}$$
$$\dot{U}_{F(2)} = -Z_{FF(2)}\dot{I}_{F(2)}$$
$$\dot{U}_{F(0)} = -Z_{FF(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

    - Z_{FF}的获取可参考：
      - 学堂在线慕课《高等电力系统分析》第八课 网络化简
      - https://next.xuetangx.com/learn/ncepuP08581001038/ncepuP08581001038/1520555/video/1484773
  - 列写故障点故障侧正负零序电压电流关系
    - 序网连接关系方程（3N个）

序分量关系分类

- 每个故障点列写故障侧正负零序电压电流关系
  - 寻找各序电压之间序电流的关系
    - 串联型故障
      - 单相接地短路和两相断开

$$\dot{I}_{F(1)} = \dot{I}_{F(2)} = \dot{I}_{F(0)}$$

$$(\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)}) + (\dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)}) + (\dot{U}_{F(0)} - z_f \dot{I}_{F(0)}) = 0$$

(a相接地短路)

    - 并联型故障
      - 两相接地短路和单相开端
      - 两相短路是两相接地短路的特殊情况（$z_g = \infty$）

$$\dot{I}_{F(1)} + \dot{I}_{F(2)} + \dot{I}_{F(0)} = 0$$

$$\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)} = \dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)} = \dot{U}_{F(0)} - (z_f + 3z_g)\dot{I}_{F(0)}$$

(bc相短路接地)

序分量关系分类

对复杂故障，问题解决了吗？

一个点发生a相短路，另一个点发生c相短路，还有一个地方发生ab相短路，怎么办？

理想移相器

- 理想移相器
  - 只改变相位
  - 目的是根据基准相列写序分量关系
- 具有通用形式
  - 计算机实现
  - 复合故障

在相同的基准相下列写网络方程

理想移相器——以单相接地为例

- **故障相为a相**

$$\dot{I}_{F(1)} = \dot{I}_{F(2)} = \dot{I}_{F(0)}$$

$$(\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)}) + (\dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)}) + (\dot{U}_{F(0)} - z_f \dot{I}_{F(0)}) = 0$$

- **故障相为b相**

$$a^2 \dot{I}_{F(1)} = a\dot{I}_{F(2)} = \dot{I}_{F(0)}$$

$$a^2(\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)}) + a(\dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)}) + (\dot{U}_{F(0)} - z_f \dot{I}_{F(0)}) = 0$$

- **故障相为c相**

$$a\dot{I}_{F(1)} = a^2 \dot{I}_{F(2)} = \dot{I}_{F(0)}$$

$$a(\dot{U}_{F(1)} - z_f \dot{I}_{F(1)}) + a^2(\dot{U}_{F(2)} - z_f \dot{I}_{F(2)}) + (\dot{U}_{F(0)} - z_f \dot{I}_{F(0)}) = 0$$

理想移相器取值

- 串联型故障

$$n_{(1)}\dot{I}_{F(1)} = n_{(2)}\dot{I}_{F(2)} = n_{(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

$$n_{(1)}(\dot{U}_{F(1)} - z_f\dot{I}_{F(1)}) + n_{(2)}(\dot{U}_{F(2)} - z_f\dot{I}_{F(2)}) + n_{(0)}(\dot{U}_{F(0)} - z_f\dot{I}_{F(0)}) = 0$$

- 并联型故障

$$n_{(1)}\dot{I}_{F(1)} + n_{(2)}\dot{I}_{F(2)} + n_{(0)}\dot{I}_{F(0)} = 0$$

$$n_{(1)}(\dot{U}_{F(1)} - z_f\dot{I}_{F(1)}) = n_{(2)}(\dot{U}_{F(2)} - z_f\dot{I}_{F(2)}) = n_{(0)}(\dot{U}_{F(0)} - (z_f + 3z_g)\dot{I}_{F(0)})$$

- 以a相为对称分量的基准相时
  - A相短路时：$n_{(1)}=n_{(2)}=n_{(0)}=1$
  - B相短路时：$n_{(1)}=a^2$, $n_{(2)}=a$, $n_{(0)}=1$
  - C相短路时：$n_{(1)}=a$, $n_{(2)}=a^2$, $n_{(0)}=1$

边界条件

- **串联型故障**

$$N_{S(1)} I_{S(1)} = N_{S(2)} I_{S(2)} = N_{S(0)} I_{S(0)}$$

$$N_{S(1)}(U_{S(1)} - Z_S I_{S(1)}) + N_{S(2)}(U_{S(2)} - Z_S I_{S(2)}) + N_{(0)}(U_{S(0)} - Z_S I_{S(0)}) = 0$$

- **并联型故障**

$$N_{P(1)} I_{P(1)} + N_{(2)} I_{P(2)} + N_{(0)} I_{P(0)} = 0$$

$$N_{(1)}(U_{P(1)} - Z_P I_{P(1)}) = N_{(2)}(U_{P(2)} - Z_P I_{P(2)}) = N_{(0)}(U_{P(0)} - Z_{P(0)} I_{P(0)})$$

复杂故障计算

- 叠加原理+理想移相器
- 把故障口分成串联型和并联型
  - 串联型故障口电压电流：Us，Is
  - 并联型故障口电压电流：Up，Ip

列写端口电压电流关系表达式

$$\dot{U}_{F(1)} = \dot{U}_F^{(0)} - Z_{FF(1)}\dot{I}_{F(1)}$$

$$\dot{U}_{F(0)} = -Z_{FF(0)}\dot{I}_{F(0)}$$

$$\dot{U}_{F(2)} = -Z_{FF(2)}\dot{I}_{F(2)}$$

边界条件

串联型故障

or

并联型故障

求解

方程个数=变量个数

可解！

复杂故障计算过程

- 已知条件
  - 电力系统的运行方式、元件的各序参数、各电源电动势、故障地点、故障类型、故障特殊相、故障处附加阻抗
- 计算步骤
  - 所需要的各序电阻参数，形成各序阻抗矩阵
  - 计算故障前各故障口电压
  - 根据故障类型建立故障方程
  - 求解故障方程

Poll 1 answer(s) at most Setting

你是否观看了相关慕课视频

A 全部看了

B 看了一部分

C 没来得及看

D 没必要看

Submit

Poll 8 answer(s) at most Setting

你认为哪几个慕课内容对你有帮助

- A 第23课 为什么对称电网可用单相网络进行分析
- B 第24课 对称分量法
- C 第25课 元件的序参数
- D 第2课 电力网络的生成
- E 第5课 节点导纳矩阵的修改
- F 第4课 节点导纳矩阵的性质
- G 第3课 节点导纳矩阵的生成
- H 第8课 网络化简
- I 没看/没帮助

Submit