

ICS 号

CCS 号

团体标准

T/GSEE XXXX—XXXX

公用电力系统电能质量事件影响域评估

Estimation of power quality event influence zones in public supply networks

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

广东省电机工程学会 发布

目次

前 言 3

1 范围 4

2 规范性引用文件 4

3 术语和定义 4

4 事件影响域评估流程 5

5 扰动参数计算方法 5

 5.1 扰动电流计算方法 5

 5.2 扰动功率计算方法 6

6 网络拓扑等效方法 6

 6.1 基本假设 6

 6.2 对称事件网络等效方法 6

 6.3 不对称事件网络等效方法 7

 6.4 变压器接线方式处理方法 7

7 事件影响域计算方法 7

 7.1 非短路扰动简化估算法 7

 7.2 基于短路分析的影响域评估方法 8

 7.3 基于潮流分析的影响域评估方法 9

8 电压事件严重程度及影响后果评估 10

 8.1 电能质量事件幅值特征 10

 8.2 能量指标 10

 8.3 严重度指标 11

 8.4 受影响用户数 11

 8.5 受影响负荷功率 11

附 录 A 13

附 录 B 14

附 录 C 18

参考文献 19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由广东省电机工程学会提出并归口。

本标准起草单位：广东电网有限责任公司广州供电局、中机研标准技术研究院（北京）有限公司、西安博宇电气有限公司、香港大学、澳门电力股份有限公司、澳门大学、南方电网科学研究院有限责任公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、深圳供电局有限责任公司、广州市香港科大霍英东研究院、深圳市中电电力技术股份有限公司、华南理工大学、暨南大学。

本标准主要起草人：冯庆燎、许庆燊、付卉青、刘军成、侯云鹤、王荣、许中、刘盾盾、惠红勋、白浩、王玲、史帅彬、廖建华、王昕。

公用电力系统电能质量事件影响域评估

1 范围

本文件规定了公用电力系统中电压暂降、电压暂升和短时中断电能质量事件的影响域预评估方法。
本文件适用于 50Hz 交流电力系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 30137—2024 电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断

GB/T 39270—2020 电压暂降指标与严重程度评估方法

GB/T 32507—2024 电能质量 术语

GB/T 15544.1—2023 三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算

3 术语和定义

GB/T 32507—2024 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电压暂降 voltage dip; voltage sag

电力系统中某点电压方均根值突然降低至 0.1 p.u.~0.9 p.u.，并在 10 ms~1 min 内恢复正常的现象。

3.2

电压暂升 voltage swell

电力系统中某点电压方均根值突然升高至 1.1 p.u.~1.8 p.u.，并在 10 ms~1 min 内恢复正常的现象。

3.3

短时中断 short interruption

电力系统中某点电压方均根值突然降低至 0.1 p.u.以下，并在 10 ms~1 min 内恢复正常的现象。

3.4

影响域 influence zone

事件发生时，供电电压可能超出预设电压阈值的、以事件源为中心的区域或距离范围。

注：预设电压阈值可能因评估目的不同而异。

3.5

扰动电流 disturbance current

在供电系统特定点产生并导致电能质量事件的电流。

注：扰动电流可能由短路、电机启动、变压器投运、电炉运行等原因引起。

3.6

扰动功率 disturbance power

扰动电流与其取值点额定电压乘积所对应的视在功率。

3.7

电能质量事件幅值特征

用于表征电压暂升、电压暂降或短时中断事件电压幅值变化程度的特征量。

3.8

能量指标

用于反映电压暂升或电压暂降事件引起的能量增强或损失程度的指标。

3.9

严重度指标

用于表征电压暂升、电压暂降或短时中断事件相对于设备耐受曲线严重程度的指标。

3.10

受影响用户数

用于表征单次预期事件影响用户规模的用户数量。

3.11

受影响负荷功率

用于表征单次预期事件影响负荷规模的有功负荷功率。

4 事件影响域评估流程

影响域评估包括事件参数确定、网络等效、影响域计算，以及事件严重程度和影响后果评价。
事件影响域评估流程见图 1，按下列步骤进行：

- a) 确定事件场景及输入参数，包括事件类型、事件位置、扰动电流或扰动功率、被评估系统电压等级、影响域判定阈值、被评估系统组成单元及类型、网络等效模型等相关参数；需要计算严重度指标时，还应确定事件持续时间和设备耐受曲线；
 - b) 根据事件类型和网络运行状态构建网络等效模型；
 - c) 计算各节点事件状态电压，并依据预设电压阈值确定事件影响域；
 - d) 计算电能质量事件幅值特征、严重度指标、能量指标、受影响用户数和受影响负荷功率；
 - e) 输出评估结论。
- 事件传播影响因素及参考判据见附录 A。

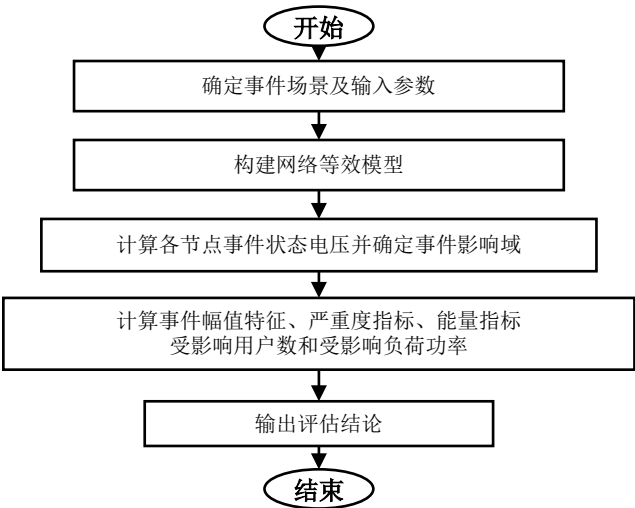


图 1 事件影响域评估流程

5 扰动参数计算方法

5.1 扰动电流计算方法

5.1.1 短路事件

对于对称或不对称短路事件，扰动电流即为短路电流，可依据 GB/T 15544.1—2023 计算得出，其中电压系数 c 取值为 1。

5.1.2 非短路事件

电机启动、变压器投运、电弧炉运行等产生的扰动电流宜采用设备制造商提供的数据；无法获取时，可通过仿真方法获得。本文件不涉及仿真方法。

5.1.3 序扰动电流计算方法

对于短路事件，正序、负序和零序短路电流均可通过短路分析获得。

对于非短路事件，已知不对称扰动电流时，可采用对称分量法计算序扰动电流；计算示例见附录 C.1。

5.2 扰动功率计算方法

5.2.1 对称事件

对于对称事件，已知扰动电流，相应的扰动功率可按式（1）计算：

$$S = \sqrt{3}U_n \times I_d \quad (1)$$

式中：

S ——扰动功率，单位为伏安（VA）；

I_d ——扰动电流，单位为安（A）；

U_n ——额定电压，单位为伏（V）。

5.2.2 不对称事件

对于相间或单相不对称事件，扰动功率与扰动电流的关系如式（2）所示：

$$S = U \times I_d \quad (2)$$

式中：

S ——扰动功率，单位为伏安（VA）；

I_d ——扰动电流，单位为安（A）；

U ——相间扰动对应的额定线电压或单相接地扰动对应的额定相电压，单位为伏（V）。

5.2.3 序扰动功率

对于不对称事件，可分别基于各序扰动电流，按式（3）计算等效序扰动功率：

$$S_{1/2/0} = \sqrt{3}U_n \times I_{1/2/0} \quad (3)$$

式中：

$S_{1/2/0}$ ——正序/负序/零序等效扰动功率，单位为伏安（VA）；

$I_{1/2/0}$ ——正序/负序/零序等效扰动电流，单位为安（A）；

U_n ——额定电压，单位为伏（V）。

6 网络拓扑等效方法

6.1 基本假设

事件影响域评估采用下列假设：

- 事件持续期间，扰动类型保持不变；
- 事件持续期间，网络拓扑保持不变；
- 变压器阻抗以分接开关在主分接位置为准；
- 正序、负序和零序系统中，忽略非旋转设备（负荷）的并联导纳；
- 正序、负序和零序系统中，忽略线路电容；
- 正序和负序系统中，忽略变压器的励磁导纳。

6.2 对称事件网络等效方法

对于对称事件，仅需考虑正序分量。

6.3 不对称事件网络等效方法

对于不对称事件，需要考虑正序、负序和零序阻抗，同时还应考虑电网接地方式和变压器接线方式（如 Yn/Yn（Y/Y）、Yn/Δ（Δ/Yn、Y/Δ、Δ/Y）以及 Y/Z（之字形）等）。

6.4 变压器接线方式处理方法

星形—三角形、三角形—星形、三角形—三角形和星形—星形等变压器接线方式，对不对称事件下正序和负序电压的传播具有重要影响。采用对称分量变换时，应考虑变压器接线方式的影响。

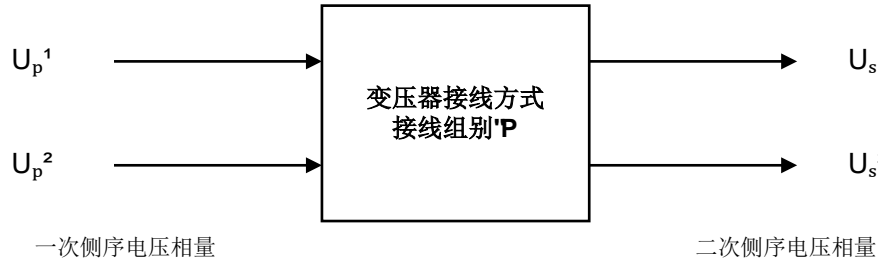


图 2 变压器接线方式对序分量传播的影响

在图 2 中，根据变压器接线方式所确定的一次侧与二次侧绕组相角偏移，通过式（4）和式（5）获得二次侧正序和负序电压分量。其中，一次侧分量相量以 12 点钟方向为基准，N 为二次侧分量相量对应的时钟序数。

$$U_s^1 = U_p^1 e^{-jN\pi/6} \quad (4)$$

$$U_s^2 = U_p^2 e^{jN\pi/6} \quad (5)$$

式中：

U_s^1 —— 变压器二次侧正序电压相量，单位为伏（V）；

U_p^1 —— 变压器一次侧正序电压相量，单位为伏（V）；

U_s^2 —— 变压器二次侧负序电压相量，单位为伏（V）；

U_p^2 —— 变压器一次侧负序电压相量，单位为伏（V）；

N——变压器接线组别对应的时钟序数，无量纲。

注：采用标幺制计算时，式（4）和式（5）中的电压相量以标幺值（p.u.）表示。

7 事件影响域计算方法

7.1 非短路扰动简化估算法

图 3 是基于扰动功率引起电压变化的简化等效电路，其中 E 为系统等值电源电压，单位为伏（V）；ZS 为与 Ssc 对应的系统等效阻抗，单位为欧姆（Ω）；S 为扰动功率，单位为伏安（VA）；Ssc 为扰动发生处的短路容量，单位为伏安（VA）；U 为扰动发生处电压，单位为伏（V）。

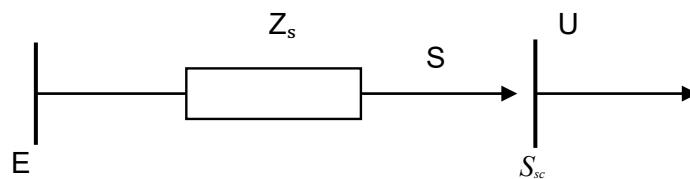


图 3 事件影响域简化评估等效电路

对称事件导致的电压变化率 d 可按式 (6) 估算；若已知扰动有功功率和无功功率 ($S=P+jQ$)，以及系统阻抗 ($Z_S=R+jX$)，则电压变化率 d 也可按式 (7) 估算：

$$d \approx \frac{S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

d ——电压变化率，单位为百分数 (%)；

S ——扰动发生处的扰动功率，通常为视在功率，单位为伏安 (VA)；

S_{sc} ——扰动发生处的短路容量，单位为伏安 (VA)。

$$d = \left| \frac{R*P + X*Q}{U_n^2} + j \frac{X*P - R*Q}{U_n^2} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中：

R ——扰动点所对应系统等效阻抗的电阻分量，单位为欧姆 (Ω)；

X ——系统等效阻抗的电抗分量，单位为欧姆 (Ω)；

P ——扰动功率的有功功率分量，单位为瓦 (W)；

Q ——扰动功率的无功功率分量，单位为乏 (var)；

U_n ——扰动发生处的额定电压，应与所采用的功率和阻抗参数相匹配，单位为伏 (V)；

对于相间不对称扰动，电压变化率 d 可按式 (8) 估算；对于单相扰动（相与中性线之间），电压变化可按式 (9) 估算：

$$d \approx \sqrt{3} \frac{S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (8)$$

$$d \approx 3 \frac{S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

S ——扰动发生处的扰动功率，通常为视在功率，单位为伏安 (VA)；

S_{sc} ——扰动发生处的短路容量，单位为伏安 (VA)。

7.2 基于短路分析的影响域评估方法

7.2.1 对称事件评估方法

对于一个包含 N 个节点的网络，对称事件发生时，节点电压 U_{kf} 等于事件发生前该节点的电压与事件引起的电压变化之和，如式 (10) 所示：

$$U_{kf} = U_{pre(k)} - Z_{kf} \times I_{df} \quad (10)$$

式中：

$U_{pre(k)}$ ——节点 k 处事件发生前的电压，单位为伏 (V)；

Z_{kf} ——节点 k 与节点 f 之间的阻抗，单位为欧姆 (Ω)；

I_{df} ——节点 f 处事件引起的扰动电流（变化量），单位为安 (A)。

注：采用标幺制计算时，式 (10) 中的电压、阻抗和电流均以相应标幺值 (p.u.) 表示。

节点 f 发生事件时的通用方程及全节点矩阵表达式见附录 C.2。若将事件发生时各节点的电压变化矩阵 ΔU 定义为式 (11)，则节点事件状态电压可按式 (12) 计算：

$$[\Delta U] = \begin{bmatrix} -Z_{11}I_{d1} & \cdots & \cdots & -Z_{1f}I_{df} & \cdots & -Z_{1N}I_{dN} \\ -Z_{21}I_{d1} & \cdots & \cdots & -Z_{2f}I_{df} & \cdots & -Z_{2N}I_{dN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -Z_{k1}I_{d1} & \cdots & \cdots & -Z_{kf}I_{df} & \cdots & -Z_{kN}I_{dN} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -Z_{N1}I_{d1} & \cdots & \cdots & -Z_{Nf}I_{df} & \cdots & -Z_{NN}I_{dN} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$U = U_{pre} + \Delta U \quad (12)$$

若忽略事件发生前的负荷，则可假设事件发生前的电压为 1 p.u.。

式 (11) 和式 (12) 中的电压变化矩阵 ΔU 、事件状态电压矩阵 U 和事件前电压矩阵 U_{pre} 的矩阵元素单位均为伏 (V)；采用标幺制计算时以标幺值 (p.u.) 表示。在式 (11) 中，第 f 列表示扰动电流作用于节点 f 时节点 $1 \sim N$ 的电压变化；第 k 行表示事件分别发生在节点 $1 \sim N$ 时节点 k 的电压变化。

7.2.2 不对称事件评估方法

对于不对称事件，与对称事件的正序分量分析类似，零序和负序电压也可采用相同方法处理，仅需将零序和负序电压的事件前电压矩阵设为零，如式 (13)、(14) 和 (15) 所示（上标 0、1、2 分别表示零序、正序和负序；各序事件状态电压矩阵、事件前电压矩阵和电压变化矩阵的矩阵元素单位均为伏 (V)，采用标幺制计算时以标幺值 (p.u.) 表示）：

$$U^0 = 0 + \Delta U^0 \quad (13)$$

$$U^1 = U_{pref}^1 + \Delta U^1 \quad (14)$$

$$U^2 = 0 + \Delta U^2 \quad (15)$$

A、B、C 三相事件状态电压可由序分量按附录 C.3 进行对称分量反变换。系统各节点三相事件状态电压矩阵可按式 (16) 表示，其中第 f 列表示节点 f 发生事件时节点 $1 \sim N$ 的三相电压，第 k 行表示事件分别发生在节点 $1 \sim N$ 时节点 k 的三相电压：

$$[U^{A,B,C}] = \begin{bmatrix} U_{11}^{A,B,C} & U_{12}^{A,B,C} & \cdots & U_{1f}^{A,B,C} & \cdots & U_{1N}^{A,B,C} \\ U_{21}^{A,B,C} & U_{22}^{A,B,C} & \cdots & U_{2f}^{A,B,C} & \cdots & U_{2N}^{A,B,C} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_{k1}^{A,B,C} & U_{k2}^{A,B,C} & \cdots & U_{kf}^{A,B,C} & \cdots & U_{kN}^{A,B,C} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_{N1}^{A,B,C} & U_{N2}^{A,B,C} & \cdots & U_{Nf}^{A,B,C} & \cdots & U_{NN}^{A,B,C} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中：

$U^{A,B,C}$ —— 系统各节点的三相电压矩阵，矩阵元素单位为伏 (V)；采用标幺制时以标幺值 (p.u.) 表示；

$U_{kf}^{A,B,C}$ —— 当事件发生在节点 f 时，节点 k 的 A、B、C 三相电压，单位为伏 (V)；采用标幺制时以标幺值 (p.u.) 表示；

k —— 被评估节点编号，无量纲；

f —— 事件发生节点编号，无量纲；

N —— 被评估网络中的节点总数，单位为个。

7.3 基于潮流分析的影响域评估方法

已知扰动功率时，可采用潮流计算获得事件发生后的各节点电压，并据此确定节点电压变化和事件影响域。

计算预期事件下的节点电压时，假设仅在事件发生节点 f 处注入扰动功率，除节点 f 外其他节点的功率均设为 0 (PQ 节点)。通过潮流计算可得到节点电压，进而可按式 (17) 计算出节点电压变化：

$$\Delta U_f^{0,1,2} = [1 - U_{1f}^{0,1,2}, 1 - U_{2f}^{0,1,2} \dots 1 - U_{jf}^{0,1,2} \dots 1 - U_{Nf}^{0,1,2}]^T \quad (17)$$

式中：

$\Delta U_f^{0,1,2}$ ——节点 f 事件对应的序电压变化标么值，采用标么值（p.u.）表示；

$U_{if}^{0,1,2}$ ——节点 i （ $i=1 \sim N$ ）的序电压标么值，采用标么值（p.u.）表示。

由潮流计算所得节点电压，可按 7.2.2 及附录 C.3 的处理方法得到三相节点电压，并依据预设电压阈值确定事件影响域。

8 电压事件严重程度及影响后果评估

8.1 电能质量事件幅值特征

采用事件发生时各节点的电压幅值变化（暂降或暂升）评估电压幅值偏离程度。

对于预期事件，在第 6.1 的基本假设成立且第 7 章事件状态电压能够代表事件持续状态特征电压的条件下，可将节点事件状态电压用于估算各节点的电压暂升幅值或残余电压。设 U_{kf}^* 为事件发生在节点 f 时，被评估节点 k 的事件状态电压幅值标么值。对于电压暂降或短时中断，估算残余电压按式（18）确定：

$$\hat{U}_{\text{res},kf}^* = U_{kf}^* \quad (18)$$

式中：

$\hat{U}_{\text{res},kf}^*$ ——事件发生在节点 f 时，节点 k 的估算残余电压标么值，采用标么值（p.u.）表示；

U_{kf}^* ——计算得到的节点事件状态电压幅值标么值，采用标么值（p.u.）表示。

对于电压暂升，估算电压暂升幅值按式（19）确定：

$$\hat{U}_{\text{max},kf}^* = U_{kf}^* \quad (19)$$

式中：

$\hat{U}_{\text{max},kf}^*$ ——事件发生在节点 f 时，节点 k 的估算电压暂升幅值标么值，采用标么值（p.u.）表示。

需要给出电压暂降深度时，可按式（20）计算：

$$\hat{D}_{\text{res},kf}^* = U_{\text{ref}}^* - \hat{U}_{\text{res},kf}^* \quad (20)$$

式中：

$\hat{D}_{\text{res},kf}^*$ ——事件发生在节点 f 时，节点 k 的估算电压暂降深度标么值，采用标么值（p.u.）表示；

U_{ref}^* ——参考电压标么值，采用标么值（p.u.）表示。参考电压取 1 p.u. 时， $\hat{D}_{\text{res},kf}^* = 1 - \hat{U}_{\text{res},kf}^*$ 。

对于多相事件，应分别计算各相的电压事件特征参数；事件级特征参数的聚合应按 GB/T 30137—2024 的规定执行。

8.2 能量指标

能量指标 EI 按 GB/T 30137—2024 计算，用于反映电压暂升或电压暂降事件引起的能量增强或损失程度。

当能够获得事件发生在节点 f 时节点 k 在事件过程中的电压方均根值序列时，单次事件能量指标可按式（21）计算：

$$EI_{kf} = \sum_{i=1}^M \left| 1 - \left(\frac{U_{i,kf}}{U_n} \right)^2 \right| \quad (21)$$

式中：

EI_{kf} ——事件发生在节点 f 时节点 k 的单次事件能量指标，无量纲；

$U_{i,kf}$ ——事件发生在节点 f 时，节点 k 在事件过程中第 i 次获得的电压方均根值，单位为伏（V）；

U_n ——标称电压，单位为伏（V）；

i ——事件过程中电压方均根值序列的采样序号，无量纲；

M ——事件过程中获得的电压方均根值数量，单位为个。

8.3 严重度指标

严重度指标 S_e 应按 GB/T 30137—2024 计算，用于表征电压暂升、电压暂降或短时中断事件相对于设备耐受曲线的严重程度；电压暂降严重程度评估可参照 GB/T 39270—2020。

当已知事件持续时间 T 和所采用的设备耐受曲线时，电压暂升事件的严重度指标按式（22）计算：

$$S_{e,kf} = \frac{U_{\max,kf}^* - 1}{U_{\text{curve}-T} - 1} \quad (22)$$

电压暂降或短时中断事件的严重度指标按式（23）计算：

$$S_{e,kf} = \frac{1 - U_{\text{res},kf}^*}{1 - U_{\text{curve}-T}} \quad (23)$$

式中：

$S_{e,kf}$ ——事件发生在节点 f 时节点 k 的严重度指标，无量纲；

$U_{\max,kf}^*$ ——电压暂升幅值标么值，采用标么值（p.u.）表示；对于预期事件可采用 8.1 得到的估算值；

$U_{\text{res},kf}^*$ ——残余电压标么值，采用标么值（p.u.）表示；对于预期事件可采用 8.1 得到的估算值；

$U_{\text{curve}-T}$ ——设备耐受曲线上与事件持续时间 T 对应的电压暂升幅值或残余电压标么值，采用标么值（p.u.）表示。

T ——事件持续时间，单位为秒（s）。

对于预期事件，采用估算幅值特征和设定或推定的 T 计算所得 S_e 应作为估算严重度结果，并应同时说明 T 和设备耐受曲线的取值依据。

8.4 受影响用户数

受影响用户数 N_u 用于表征单次预期事件影响的用户规模。

设 W_f 为事件发生在节点 f 时依据预设电压阈值或设备耐受判据确定的事件影响域。节点影响判别量 δ_{kf} 按式（24）确定：

$$\delta_{kf} = \begin{cases} 1, & k \in \Omega_f \\ 0, & k \notin \Omega_f \end{cases} \quad (24)$$

式中：

δ_{kf} ——节点影响判别量，无量纲；

Ω_f ——事件发生在节点 f 时的事件影响域，不适用量纲。

若节点 k 所连接的用户数为 $N_{u,k}$ ，则事件发生在节点 f 时的受影响用户数按式（25）计算：

$$N_{u,f} = \sum_{k=1}^N N_{u,k} \delta_{kf} \quad (25)$$

式中：

$N_{u,f}$ ——事件发生在节点 f 时的受影响用户数，单位为用户；

$N_{u,k}$ ——节点 k 所连接的用户数，单位为用户；

N ——被评估供电系统中的节点总数，单位为个。

8.5 受影响负荷功率

受影响负荷功率 P_a 用于表征单次预期事件影响的负荷规模。

若节点 k 在所评估运行方式下的有功负荷功率为 $P_{L,k}$ ，则事件发生在节点 f 时的受影响负荷功率按式（26）计算：

$$P_{a,f} = \sum_{k=1}^N P_{L,k} \delta_{kf} \quad (26)$$

式中：

$P_{a,f}$ ——事件发生在节点 f 时的受影响负荷功率，单位为瓦（W）；

$P_{L,k}$ ——节点 k 在所评估运行方式下的有功负荷功率，单位为瓦（W）；

δ_{kf} ——节点影响判别量，无量纲。

N ——被评估供电系统中的节点总数，单位为个。

附 录 A
(资料性)
电压事件传播及影响因素

A.1 一般规定与参考判据

对称事件和不对称事件在电力系统中的传播方式不同。变压器接线方式、系统接地方式等不同因素对事件传播的影响也存在差异。

电压暂升、电压暂降和短时中断的事件判定宜按 GB/T 30137—2024 执行。参考判据如下；具体工程应用时，影响域判定阈值应根据适用技术要求或评估目的确定。

- a) 电压暂升：参考阈值为 1.1 p.u.，典型幅值范围为 1.1 p.u. ~ 1.8 p.u.，持续时间为 10 ms ~ 1 min；
- b) 电压暂降：参考阈值为 0.9 p.u.，典型幅值范围为 0.1 p.u. ~ 0.9 p.u.，持续时间为 10 ms ~ 1 min；
- c) 短时中断：参考阈值为 0.1 p.u.，电压方均根值低于 0.1 p.u.，持续时间为 10 ms ~ 1 min。

事件影响域计算方法按输入参数选用：非短路扰动可采用 7.1 进行快速筛选；已知扰动电流时采用 7.2；已知扰动功率时采用 7.3。

A.2 事件源

A.2.1 轻微事件

轻微事件主要包括：

- a) 电机启动；
- b) 变压器投运；
- c) 负荷投切（含补偿电容器和分布式电源）；
- d) 各类扰动负荷运行。

A.2.2 严重事件

严重事件主要指故障，包括对称短路和不对称短路。

A.3 电压事件类型

电压事件分为对称事件和不对称事件两类。

A.4 事件传播影响因素

A.4.1 电网接地方式

电网接地方式主要包括：

- a) 直接接地；
- b) 非直接接地。

A.4.2 变压器接线方式

变压器接线方式主要包括：

- a) Y_n/Y_n (Y/Y)；
- b) Y_n/Δ (Δ/Y_n 、 Y/Δ 、 Δ/Y)。

A.4.3 其他影响因素

A.4.3.1 继电保护与自动控制

重合闸与自动控制的作用主要包括：

- a) 故障清除；
- b) 重合闸（重复性事件或事件序列）；
- c) 电压恢复。

A.4.3.2 无功补偿

无功补偿装置的配置和运行状态会影响电压事件的传播范围和严重程度，合理的无功补偿可缓解电压跌落幅度。

A.4.3.3 负荷特性

电压恢复阶段，负荷的持续连接状态会影响电压恢复速度和稳定性，不同类型负荷（如感应电机、电子设备等）特性会对事件传播分析结果产生影响。

附录 B

（资料性）

事件影响域评估示例

附录 B 给出了短路故障引起电能质量事件影响域评估示例。

如图 B.1 所示，各元件参数如下：发电机 G-1 和 G-2 的额定容量分别为 100 MVA 和 200 MVA，额定电压均为 10.5 kV，次暂态电抗均为 0.2 p.u.。两台发电机的中性点均不接地。

变压器：T-1 和 T-2 的额定容量分别为 100 MVA 和 200 MVA，变比分别为 115 kV/10.5 kV，短路电压百分数均为 10%。两台变压器均采用 Y Δ 接线，发电机侧为 Δ 接线。

线路：三条输电线路的参数完全相同，长度均为 60 km，电抗为 0.44 Ω /km，电容为 0.08 F/km。三条输电线路的零序电抗标幺值均为 0.2 p.u.，基准容量为 50 MVA。

负荷： $S_{D1}=50+j25$ MVA； $S_{D2}=25+j0$ MVA。

以下以节点 3 处发生单相短路事件为例，说明第 5 章～第 8 章所述方法的应用。

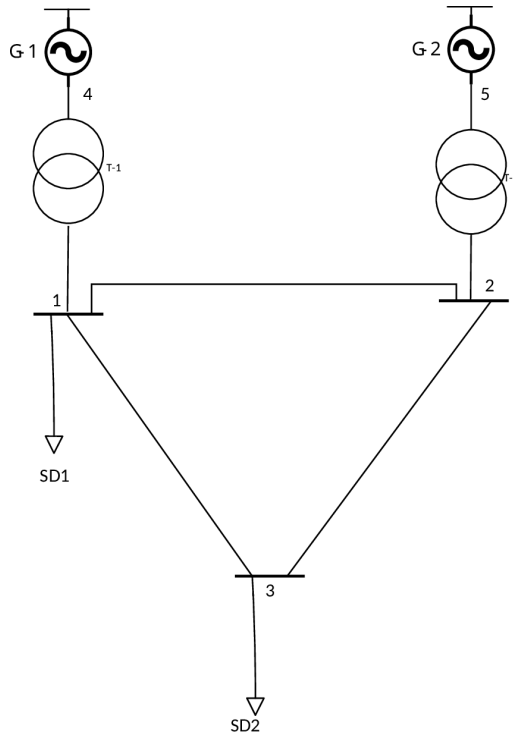


图 B.1 示例网络

B.1 阻抗矩阵

根据图 B.1 给定的参数，与节点 3 处事件相关的正序、负序阻抗如式 (B-1) 所示，零序阻抗如式 (B-2) 所示。

$$Z_{1/2} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & Z_{13,1/2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & Z_{23,1/2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & Z_{33,1/2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & Z_{43,1/2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & Z_{53,1/2} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 + 0.0557i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + 0.0471i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + 0.1014i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + 0.0371i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + 0.0314i & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$$Z_0 = \begin{bmatrix} \dots & \dots & Z_{13,0} \\ \dots & \dots & Z_{23,0} \\ \dots & \dots & Z_{33,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 + 0.022i \\ \dots & \dots & 0 + 0.014i \\ \dots & \dots & 0 + 0.118i \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

式 (B.1) 和式 (B.2) 中的正序、负序和零序阻抗均采用标幺值 (p.u.) 表示。

B.2 扰动电流

对于节点 3 处的单相短路，正序、负序和零序扰动电流按 GB/T 15544.1—2023 计算，结果如下。

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_0 = 0 - 3.1167i \quad (\text{B.3})$$

式 (B.3) 中的正序、负序和零序扰动电流均采用标幺值 (p.u.) 表示。

B.3 与事件相关的电压变化

根据 7.2.1 所述节点电压变化关系，可得到正序、负序和零序电压变化，分别如式 (B-4)、式 (B-5) 和式 (B-6) 所示。

$$\Delta U_{1=} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \Delta U_{13,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{23,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{33,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{43,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{53,1} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.17360019 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.14679657 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.31603338 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.11562957 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.09786438 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

$$\Delta U_{2=} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \Delta U_{13,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{23,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{33,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{43,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \Delta U_{53,2} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.17360019 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.14679657 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.31603338 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.11562957 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.09786438 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$$\Delta U_0 = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \Delta U_{13,0} \\ \dots & \dots & \Delta U_{23,0} \\ \dots & \dots & \Delta U_{33,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.0685674 \\ \dots & \dots & -0.0436338 \\ \dots & \dots & -0.3677706 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

式 (B.4) ~ 式 (B.6) 中的正序、负序和零序电压变化均采用标幺值 (p.u.) 表示。

B.4 事件状态电压与估算残余电压

假设事件发生前的正序电压为 1 p.u.，负序电压和零序电压均为 0 p.u.。根据 7.2.1 和 7.2.2，可得到与该预期事件相关的节点事件状态电压。在第 6.1 基本假设成立时，该结果可按 8.1 作为电压暂降或短时中断事件的估算残余电压。

$$U_{1=} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 1 + \Delta U_{13,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 + \Delta U_{23,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 + \Delta U_{33,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 + \Delta U_{43,1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 + \Delta U_{53,1} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0.82639981 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.82639981 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.68396662 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.88437043 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.90213562 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

$$U_{2=} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 + \Delta U_{13,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + \Delta U_{23,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + \Delta U_{33,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + \Delta U_{43,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 + \Delta U_{53,2} & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.17360019 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.14679657 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.31603338 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.11562957 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.09786438 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

$$U_0 = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0 + U_{13,0} \\ \dots & \dots & 0 + U_{23,0} \\ \dots & \dots & 0 + U_{33,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.0685674 \\ \dots & \dots & -0.0436338 \\ \dots & \dots & -0.3677706 \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

式 (B.7) ~ 式 (B.9) 中的正序、负序和零序事件状态电压均采用标幺值 (p.u.) 表示。

B.5 变压器接线方式的影响

图 B.1 所示节点 1 与节点 4 之间、节点 2 与节点 5 之间的变压器均采用 Y₀/Δ 接线，且发电机侧为 Δ 接线。该接线方式会影响正序、负序和零序电压及电流。根据 6.4 及式 (4) 和式 (5)，相应序电压如下。

$$U_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ e^{j\pi/6} \\ e^{j\pi/6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & 0.82639981 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.82639981 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.68396662 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.76586479238+0.442185215i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.78124944692+0.45106781i & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

$$U_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ e^{-j\pi/6} \\ e^{-j\pi/6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.17360019 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.14679657 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.31603338 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.10013520762+0.057814785i & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.08475055308+0.04893219i & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

$$U_0 = \begin{bmatrix} \dots & \dots & -0.0685674 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.0436338 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & -0.3677706 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.00000000 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0.00000000 & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

式 (B.10) ~ 式 (B.12) 中的正序、负序和零序电压均采用标幺值 (p.u.) 表示。

B.6 电压影响域

按附录 C.3 进行对称分量反变换, 得到该事件引起的三相事件状态电压, 并按 8.1 作为各节点的估算残余电压。对于节点 3 处发生的单相短路事件, 其结果如式 (B-13) 所示, 矩阵第 1 列至第 3 列依次为 A、B、C 相电压; 各节点估算残余电压如图 B.2 所示, 并据此判定事件影响域。

由图可直观看出, 若以 85%UN 作为关注电压阈值, 则 A 相的节点 1、节点 2、节点 3、节点 4 和节点 5, 以及 C 相的节点 4 和节点 5 均受到该事件影响。该结果构成节点 3 发生事件时的影响域。

注: 本示例中的 85% U_N 仅作为说明影响域判定方法的关注阈值。

$$U_3^{ABC} = \begin{bmatrix} 0.584232 & 0.951817 & 0.951817 \\ 0.662773 & 0.952594 & 0.952594 \\ 0.000163 & 1.026825 & 1.026825 \\ 0.832584 & 0.999956 & 0.832557 \\ 0.857386 & 0.999956 & 0.857360 \end{bmatrix} \quad (\text{B.13})$$

式 (B.13) 中的三相事件状态电压均采用标幺值 (p.u.) 表示。

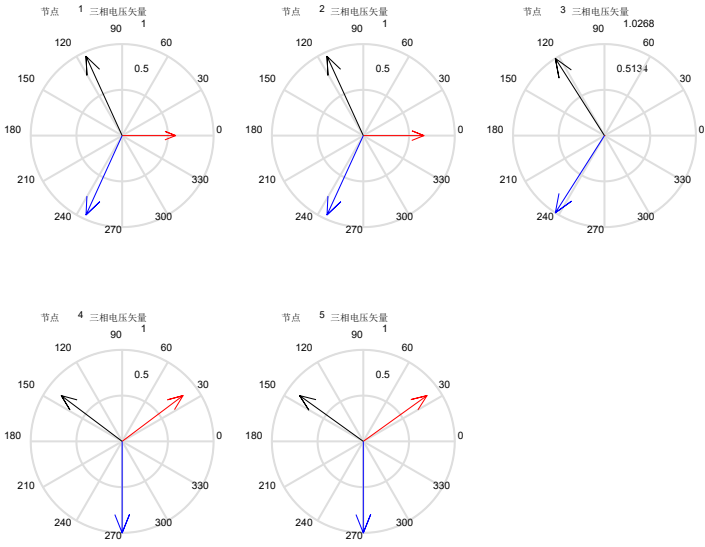


图 B.2 节点 3 发生单相短路时各节点的估算残余电

附 录 C
(资料性)
补充计算公式

C.1 序扰动电流计算示例

采用对称分量法提取序扰动电流的示例如图 C.1 所示。

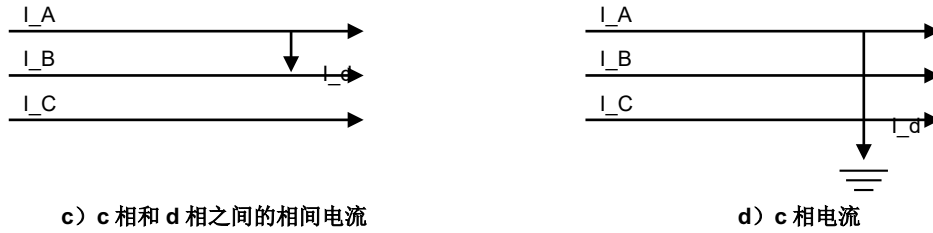


图 C.1 不对称扰动电流

通过对称分量法，图 C.1 中 a) 和 b) 所对应的等效序扰动电流分别按式 (C.1) 和式 (C.2) 计算：

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \angle -30^\circ \\ I_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \angle 30^\circ \end{aligned} \quad (C.1)$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{2} I_d \quad (C.2)$$

式中：

I_1 ——正序扰动电流，单位为安 (A)；

I_2 ——负序扰动电流，单位为安 (A)；

I_0 ——零序扰动电流，单位为安 (A)；

I_d ——扰动电流，单位为安 (A)。

C.2 节点电压通用方程与矩阵表达式

节点 f 发生事件时，节点 1~N 的电压可按式 (C.3) 的通用方程表示：

$$\begin{bmatrix} \dots\dots\dots U_{1f} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{2f} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{kf} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{Nf} \dots\dots\dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots\dots\dots U_{pre(1)} - Z_{1f} I_{df} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{pre(2)} - Z_{2f} I_{df} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{pre(k)} - Z_{kf} I_{df} \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots U_{pre(N)} - Z_{Nf} I_{df} \dots\dots\dots \end{bmatrix} \quad (C.3)$$

若事件发生在 1~N 的每个节点上，则各节点电压可按式 (C.4) 表示：

$$\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1f} & \dots & U_{1N} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2f} & \dots & U_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{k1} & U_{k2} & \dots & U_{kf} & \dots & U_{kN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{N1} & U_{N2} & \dots & U_{Nf} & \dots & U_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{pre(1)} - Z_{11}I_{d1} & \dots & U_{pre(1)} - Z_{1f}I_{df} & \dots & U_{pre(1)} - Z_{1N}I_{dN} \\ U_{pre(2)} - Z_{21}I_{d1} & \dots & U_{pre(2)} - Z_{2f}I_{df} & \dots & U_{pre(2)} - Z_{2N}I_{dN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{pre(k)} - Z_{k1}I_{d1} & \dots & U_{pre(k)} - Z_{kf}I_{df} & \dots & U_{pre(k)} - Z_{kN}I_{dN} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{pre(N)} - Z_{N1}I_{d1} & \dots & U_{pre(N)} - Z_{Nf}I_{df} & \dots & U_{pre(N)} - Z_{NN}I_{dN} \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

式中：

U_{kf} ——事件发生在节点 f 时节点 k 的电压，单位为伏（V）；

$U_{pre(k)}$ ——节点 k 处事件发生前的电压（ $k=1\sim N$ ），单位为伏（V）；

Z_{kf} ——节点 k （ $k=1\sim N$ ）与节点 f （ $f=1\sim N$ ）之间的阻抗，单位为欧姆（ Ω ）；

I_{df} ——节点 f （ $f=1\sim N$ ）处事件引起的扰动电流，单位为安（A）。

注：采用标么制计算时，式（C.3）和式（C.4）中的电压、阻抗和电流均以相应标么值（p.u.）表示。

C.3 三相电压对称分量反变换

对于 380 V 低压台区，应结合系统接地方式和变压器接线方式保留相应零序分量。

A、B、C 三相电压可通过对称分量反变换按式（C.5）和式（C.6）计算，其中旋转因子按式（C.7）确定：

$$\begin{aligned} U^A &= U^0 + U^1 + U^2 \\ U^B &= U^0 + a^2 U^1 + a U^2 \\ U^C &= U^0 + a U^1 + a^2 U^2 \end{aligned} \quad (C.5)$$

$$\begin{aligned} U^A &= U_{pref}^1 + \Delta U^0 + \Delta U^1 + \Delta U^2 \\ U^B &= a^2 U_{pref}^1 + \Delta U^0 + a^2 \Delta U^1 + a \Delta U^2 \\ U^C &= a U_{pref}^1 + \Delta U^0 + a \Delta U^1 + a^2 \Delta U^2 \end{aligned} \quad (C.6)$$

其中：

$$\begin{aligned} a &= e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{j240} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (C.7)$$

式中：

U^A 、 U^B 、 U^C ——A、B、C 三相电压，单位为伏（V）；

U^0 、 U^1 、 U^2 ——零序、正序和负序电压，单位为伏（V）；

U_{pre}^1 ——事件发生前正序电压，单位为伏（V）；

ΔU^0 、 ΔU^1 、 ΔU^2 ——零序、正序和负序电压变化，单位为伏（V）；

a ——旋转因子，无量纲；

j ——虚数单位，无量纲。

注：采用标么制计算时，式（C.5）和式（C.6）中的电压量以标么值（p.u.）表示。

参考文献

- [1] GB/T 30137—2024 电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断
- [2] GB/T 39270—2020 电压暂降指标与严重程度评估方法
- [3] GB/T 32507—2024 电能质量 术语
- [4] GB/T 15544.1—2023 三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算