

团 体 标 准

XX/T XXXXX—XXXX

城市轨道交通杂散电流对变压器直流偏磁 影响评估及防护导则

Technical guidelines for evaluating and protecting for the influence of stray current
in urban rail transit on DC bias of transformers

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电力技术市场协会 发布

目 次

前 言	2
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语及定义	3
4 评估指标及限值	4
5 评估方法	6
6 防护方法	11
附 录 A （资料性） 城市轨道交通与电网耦合模型建立方法	13

前 言

本文件按照GB/T 1.12020《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

本文件由西南交通大学提出。

请注意本文件的某些内容可能是涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电力技术市场协会归口。

本文件主要起草单位：

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至xxxxxX。

城市轨道交通杂散电流对变压器直流偏磁影响评估及防护导则

1 范围

本文件规定了城市轨道交通杂散电流对变压器直流偏磁的影响评估指标及限值、评估方法和防护方法等。

本文件适用于城市轨道交通杂散电流对110kV及以上变电站变压器直流偏磁影响评估及防护。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 1094 电力变压器

GB/T 2900.10 电工术语 电缆

GB/T 17949.1 接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量导则 第1部分:常规测量

GB/T 28026.2 轨道交通 地面装置 电气安全、接地和回流 第2部分：直流牵引供电系统杂散电流的防护措施

GB/T 50091 埋地钢制管道直流干扰防护技术标准

GB 50490 城市轨道交通技术规范

CJJ/T 49 地铁杂散电流腐蚀防护技术标准

DL/T 437 高压直流接地极技术导则

DL/T 1786 直流偏磁电流分布同步监测技术导则

DL/T 1957 电网直流偏磁风险评估与防御导则

SYT 0030 油气田及管道腐蚀与防护工程基本词汇

3 术语及定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 城市轨道交通 **traction substation**

采用专用轨道导向运行的城市公共客运交通系统，包括地铁系统、轻轨系统、单轨系统、有轨电车、磁悬浮系统、自动导向轨道系统、市域快速轨道系统。

[来源：GB 50490]

3.2 杂散电流 **stray current**

在非指定回路上流动的电流。或因接地，流入大地或埋地金属物体中的泄漏电流。

[来源：CJJ/T 49，有修改]

3.3 直流偏磁电流 DC bias current

流经以线路、变压器绕组、变压器中性点接地点为回路的直流电流。

[来源：DL/T 1786]

3.4 电缆回流线 cable return line

与电缆线路中的电缆平行的单独导体或单芯电缆，与电缆本身构成闭合电路的一部分。

[来源：GB/T 2900.10，有修改]

3.5 接地线缆 grounding wire and cable

在变电站内架空地线和电缆的金属护套、铠装或回流线与变电站接地网形成电气连接的线缆。

3.6 地表电位梯度 soil surface potential gradient

单位长度上地表电位的变化值或电位对距离的变化。

[来源：SYT 0030]

4 评估指标及限值

4.1 变压器直流偏磁电流

4.1.1 指标计算

杂散电流入侵变电站后，变压器直流偏磁电流应按式计算：

$$A_1 = \begin{cases} \sqrt{\sum_{m=1}^n i_m^2 / n}, \sum_{m=1}^n i_m \geq 0 \\ -\sqrt{\sum_{m=1}^n i_m^2 / n}, \sum_{m=1}^n i_m < 0 \end{cases}, \quad n = fT (T \text{ 不小于列车发车间隔}) \quad (1)$$

式中：

A_1 —变压器直流偏磁电流；

i_m —变压器直流偏磁电流实时数据，单位为安培（A）；

n —采样数；

f —采样频率，单位为赫兹（Hz）；

T —采样时间，单位为秒（s），采样时间不应小于列车发车间隔，不能确定列车发车间隔时，可采用最大发车间隔。

4.1.2 指标限值

变压器直流偏磁电流限值选取应符合DL/T 437的规定，并应符合下列规定：

- 对于110kV及220kV变电站，三相三柱式变压器直流偏磁电流的限值不应大于额定电流的2.1%；
- 对于110kV及220kV变电站，三相五柱式变压器直流偏磁电流的限值不应大于额定电流的1.5%；
- 对于500kV变电站，500kV自耦变压器直流偏磁电流的限值不应大于额定电流的0.9%。

4.2 接地线缆直流电流

4.2.1 指标计算

杂散电流侵入变电站后，可通过接地线缆传播。接地线缆直流电流应按下列公式计算：

$$A_2^+ = \sum_{l=1}^n i_l / n, \quad i_l \geq 0, \quad n = fT (T \text{ 不小于列车发车间隔}) \quad (2)$$

$$A_2^- = \sum_{l=1}^n i_l / n, \quad i_l < 0, \quad n = fT (T \text{ 不小于列车发车间隔}) \quad (3)$$

$$A_2 = \max\{|A_2^-|, |A_2^+|\} \quad (4)$$

式中：

A_2 —接地线缆直流电流；

A_2^+ —通过接地线缆流入接地网方向的直流电流；

A_2^- —通过接地网流入接地线缆方向的直流电流；

i_l —接地线缆直流电流实时数据，单位为安培（A）；

n —采样数；

f —采样频率，单位为赫兹（Hz）；

T —采样时间，单位为秒（s），采样时间不应小于列车发车间隔，不能确定列车发车间隔时，可采用最大发车间隔。

4.2.2 指标限值

接地线缆直流电流限值选取应符合下列规定：

- 对于110kV变电站，接地线缆直流电流限值不应小于110kV变压器直流偏磁电流限值；
- 对于220kV变电站，接地线缆直流电流限值不应小于220kV变压器直流偏磁电流限值；
- 对于500kV变电站，接地线缆直流电流限值不应小于500kV变压器直流偏磁电流限值。

4.3 变电站地表电位梯度

4.3.1 指标计算

杂散电流可导致变电站地表电位变化，利用变电站地表电位梯度可评价变电站受杂散电流影响程度。变电站地表电位梯度应按下列公式计算：

$$A_3 = \sqrt{\Delta U_x^2 + \Delta U_y^2} \quad (5)$$

$$A_3 = \sum_{i=1}^n A_{3,i} / n, \quad i \geq 0, \quad n = fT (T \geq \text{列车发车间隔}) \quad (6)$$

式中：

A_3 —变电站地表电位梯度；

$\Delta U_{x,i}$ —第*i*次采样时东西方向单位距离地表电位差；

$\Delta U_{y,i}$ —第*i*次采样时南北方向单位距离地表电位差；

n —采样点个数；

f —采样频率，单位为赫兹（Hz）；

T —采样时间，单位为秒（s），采样时间不应小于城市轨道交通列车发车间隔，不能确定列车发车间隔时，可采用最大发车间隔。

4.3.2 指标限值

地表电位梯度的限值选取应符合GB/T 50091的规定，并应符合下列规定：

- a) 距离城市轨道交通线路2km内，变电站地表电位梯度限值不应大于2.5mV/m；
- b) 距离城市轨道交通线路2km以上，变电站地表电位梯度限值不应大于0.5mV/m。

4.4 变压器直流偏磁电流越限时间占比

4.4.1 指标计算

变压器直流偏磁电流越限时间占比应按下列式计算：

$$A_4 = \frac{P_{i_m \geq i_{th}}}{n}, \quad n = fT (T \geq \text{列车发车间隔}) \quad (7)$$

式中：

A_4 —变压器直流偏磁电流越限时间占比；

i_m —变压器直流偏磁电流，单位为安培（A）；

i_{th} —变压器直流偏磁电流限值，单位为安培（A）；

P —变压器直流偏磁电流越限次数；

n —采样数；

f —采样频率，单位为赫兹（Hz）；

T —采样时间，单位为秒（s），采样时间不应小于轨道交通列车发车间隔，不能确定列车发车间隔时，可采用最大发车间隔。

4.4.2 指标限值

变压器直流偏磁电流越限时间占比限值选取应符合下列规定：

- a) 对于110kV变电站，变压器直流偏磁电流越限时间占比限值不应大于30%；
- b) 对于220kV变电站，变压器直流偏磁电流越限时间占比限值不应大于20%；
- c) 对于500kV变电站，变压器直流偏磁电流越限时间占比限值不应大于10%。

5 评估方法

5.1 一般规定

评估时，应建立城市轨道交通与电网耦合模型，计算杂散电流影响下变压器直流偏磁电流、接地线缆直流电流、变电站地表电位及变压器直流偏磁电流越限时间占比，量化评估杂散电流影响。

5.2 评估流程

评估流程应按下列步骤执行：

- a) 根据评估任务和目的确定评估对象范围；

b) 收集评估对象的城市轨道交通车站、线路、牵引变电站、牵引主所、车辆段、停车场等地理信息分布，牵引供电系统结构及参数，回流系统导体结构及参数，贯通接地导体类型及参数等。无法提供的，可按已知城市轨道交通结构及参数确定；

c) 收集评估对象的电网拓扑和设备资料，无法提供的，可参照同类型设备确定；

d) 收集评估对象主要土壤类型及电阻率分布；

e) 确定评估考核点和评估指标限值；

f) 根据收集的资料，建立城市轨道交通与电网耦合模型；

g) 分析城市轨道交通列车、钢轨电位限制装置、单向导通装置运行状态，计算主变中性点直流、线缆中的直流和变电站地表电位实时数据；

h) 根据实时数据，计算评估指标，并与评估指标的限值比较，评估杂散电流影响等级。

5.3 城市轨道交通与电网耦合模型

5.3.1 一般要求

城市轨道交通与电网耦合模型宜根据城市轨道交通线路分布以及220kV及以上变电站分布、连接拓扑、城市土壤电阻率分布确定，应分析不同电网运行方式的影响。城市轨道交通与电网耦合模型建模方法见附录A。

5.3.2 城市轨道交通模型

城市轨道交通模型应满足下列要求：

a) 模型中车站、停车场、车辆段及线路拓扑及相对地理信息应与实际一致；

b) 模型应包含正线、车辆段、停车场等不同线路段，车辆段和停车场钢轨应通过单向导通装置连接至正线钢轨；

c) 模型应包含牵引供电系统、回流系统和接地系统；

d) 模型中的牵引供电系统应包含接触网和牵引变电站，并具有正线全线贯通结构；

e) 车站、停车场和车辆段位置应建有钢轨电位限制装置；

f) 模型的正线路段回流系统应包含上下行轨道和排流网，并具有正线贯通结构，车辆段和停车场回流系统应包含轨道；

g) 城市轨道交通接地系统应包含接地网、贯通地线、电缆铠装电缆、接地扁钢，具有正线与停车场、车辆段贯通的结构；

h) 多条城市轨道交通线路的接地网应在换乘站位置连接。

5.3.3 电网模型

电网模型应满足下列要求：

a) 模型中电网拓扑、变电站地理信息及变电站连接关系应与实际一致；

b) 模型应包含主变中性点接地的110kV变电站、220kV及以上变电站及城市轨道交通主变电所；

c) 模型变电站中应包含中性点接地变压器、自耦变压器、进站母线、出站母线、接地网和输电线；

d) 模型变电站中架空地线、电缆铠装电缆和回流线应接入接地网同一点，且变压器中性点不应与线缆共用接地点。

5.3.4 耦合路径模型

城市轨道交通与电网耦合模型应满足下列要求：

- a) 城市轨道交通线路与变电站相对地理分布应与实际一致；
- b) 模型中牵引变电站接地网应通过电缆铠装电缆连接至为城市轨道交通供电的110kV变电站接地网；
- c) 模型土壤电阻率与主要土壤类型电阻率应保持一致。

5.4 城市轨道交通与电网耦合模型计算

城市轨道交通与电网耦合模型计算应符合下列规定：

- a) 城市轨道交通列车运行工况应与城市轨道交通牵引计算和潮流计算结果或列车实际牵引电流关系保持一致；
- b) 城市轨道交通列车运行数量及其分布应与列车运行图保持一致；
- c) 计算应分析电网运行方式；
- d) 计算采样间隔不应大于1s；
- e) 计算总时间长度不应小于一个列车发车间隔时间。

5.5 评估指标计算

5.5.1 变压器直流偏磁电流计算

变压器直流偏磁电流计算应符合下列规定：

- a) 对于自耦变压器，变压器绕组结构如图1所示。变压器高压绕组和中压绕组共同经公共绕组中性点接地，变压器直流偏磁电流应按式计算：

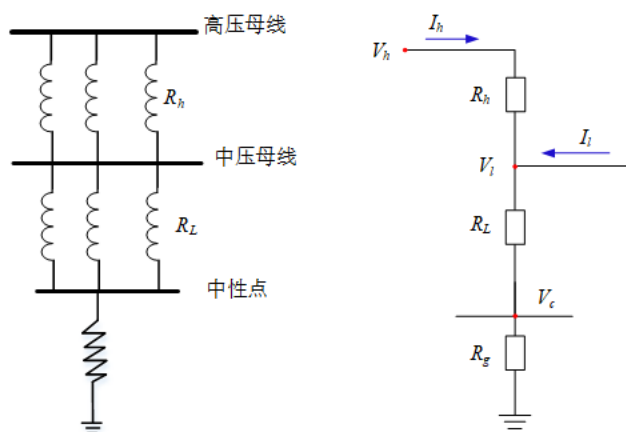


图1 自耦变压器绕组结构示意图

$$I_m = I_h + I_l / K$$

$$I_m = (V_h - V_l) / R_h + \frac{(V_h - V_l) / R_h - (V_l - V_c) / R_L}{K} \quad (8)$$

式中：

- I_m — 变压器直流偏磁电流，单位为安培（A）；
- I_h — 流经变压器高压绕组的直流电流，单位为安培（A）；
- I_l — 流经变压器中压绕组的直流电流，单位为安培（A）；
- V_h — 变压器高压绕组电压，单位为伏特（V）；
- V_l — 变压器中压绕组电压，单位为伏特（V）；
- R_h — 变压器高压绕组直流电阻，单位为欧姆（ Ω ）；

R_l 一变压器公共绕组直流电阻，单位为欧姆（ Ω ）；

K 一变压器高中压侧变比。

b) 对于三绕组变压器，变压器绕组结构如图2所示，高压绕组与低压绕组分别通过各自中性点接地，变压器直流偏磁电流应按下式计算：

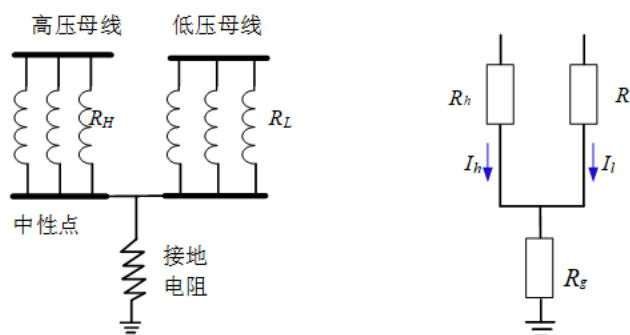


图2 三相绕组变压器绕组结构示意图

$$\begin{aligned} I_{m \cdot h} &= I_h \\ I_{m \cdot l} &= I_l \end{aligned} \quad (9)$$

式中：

$I_{m \cdot h}$ 一变压器高压绕组直流偏磁电流，单位为安培（A）；

$I_{m \cdot l}$ 一变压器低压绕组的直流偏磁电流，单位为安培（A）；

I_h 一变压器高压侧中性点流过的直流电流，单位为安培（A）；

I_l 一变压器低压侧中性点流过的直流电流，单位为安培（A）。

5.5.2 接地线缆直流电流

接地线缆直流电流应按下列公式计算：

a) 变电站架空地线接地直流电流应按下式计算：

$$I_l^1 = C I_s \quad (10)$$

式中：

I_l^1 一连接两变电站架空地线接地直流电流；

I_s 一单回架空线接地直流电流；

C 一连接两变电站的架空地线回数。

b) 变电站接地线缆直流电流应按下式计算：

$$I_l^2 = 3 N I_i \quad (11)$$

式中：

I_l^2 一连接两变电站电缆铠装接地直流电流；

I_i 一单相接地线缆直流电流；

N 一连接两变电站的铠装电缆回数。

c) 变电站电缆回流线接地直流电流应按下式计算：

$$I_l^3 = M I_c \quad (12)$$

式中：

I^3 —两变电站电缆的回流线接地直流电流；

I_c —单根电缆回流线接地直流电流；

M —两变电站电缆的回流线数量。

5.5.3 地表电位梯度计算

地表电位梯度计算时，应选取变电站中心位置，确定东西与南北方向，获得十字交叉坐标系中等距离4个位置的地表电位，如图3所示。地表电位梯度应按式计算：

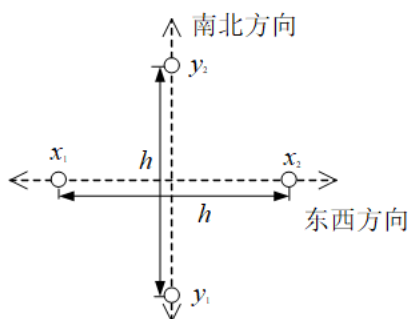


图3 地表电位梯度方向示意图

$$\begin{aligned}\Delta U_x &= (U_{x1} - U_{x2}) / h \\ \Delta U_y &= (U_{y1} - U_{y2}) / h\end{aligned}\quad (13)$$

式中：

ΔU_x —东西方向单位距离地表电位差；

ΔU_y —南北方向单位距离地表电位差；

U_{x1} , U_{x2} —东西方向点 x_1 , x_2 地表电位；

U_{y1} , U_{y2} —南北方向点 y_1 , y_2 地表电位；

h —地表电位测量距离，不应小于20m。

5.6 三级评估

5.6.1 第一级评估

符合下列条件之一的变电站，受杂散电流影响等级应为一级：

- 变压器直流偏磁电流、任意接地线缆直流电流、地表电位梯度、变压器直流偏磁电流越限时间占比全部超过限值；
- 变电站变压器直流偏磁电流超过限值的2倍；
- 任意接地线缆直流电流超过限值的2倍；
- 变压器直流偏磁电流越限时间占比超过限值的2倍；
- 变电站变压器直流偏磁电流超过限值，或压器直流偏磁电流越限时间占比超过限值，且任意接地线缆直流电流超过限值；
- 任意类接地线缆直流电流超过限值，且变电站地表电位梯度超过限值2倍。

5.6.2 第二级评估

不符合第一级评估条件，且符合下列条件之一的变电站，受杂散电流影响等级应为二级：

- a) 变压器直流偏磁电流、任意接地线缆直流电流、地表电位梯度或压器直流偏磁电流越限时间占比，任一评价指标超过限值；
- b) 变压器直流偏磁电流超过限值的0.8倍，或压器直流偏磁电流越限时间占比超过限值0.8倍，且任意接地线缆直流电流超过限值0.5倍；
- c) 任意接地线缆直流电流超过限值0.5倍，且变电站地表电位梯度超过限值0.5倍。

5.6.3 第三级评估

不符合第一级和第二级评估条件的变电站，受杂散电流影响等级应为三级。

6 防护方法

6.1 一般规定

评估等级为一级及二级的变压器应安装中性点隔直装置。

6.2 安装要求

变压器中性点隔直装置安装应满足下列要求：

- a) 中性点隔直装置安装不应影响变电站及变压器设备安全稳定运行，不应因隔直装置造成保护误动或拒动；
- b) 当变电站多个变压器经同一中性点接地时，仅应在中性点位置安装隔直装置；
- c) 当变电站多个变压器分别通过各自中性点接地时，应对每个中性点安装隔直装置；

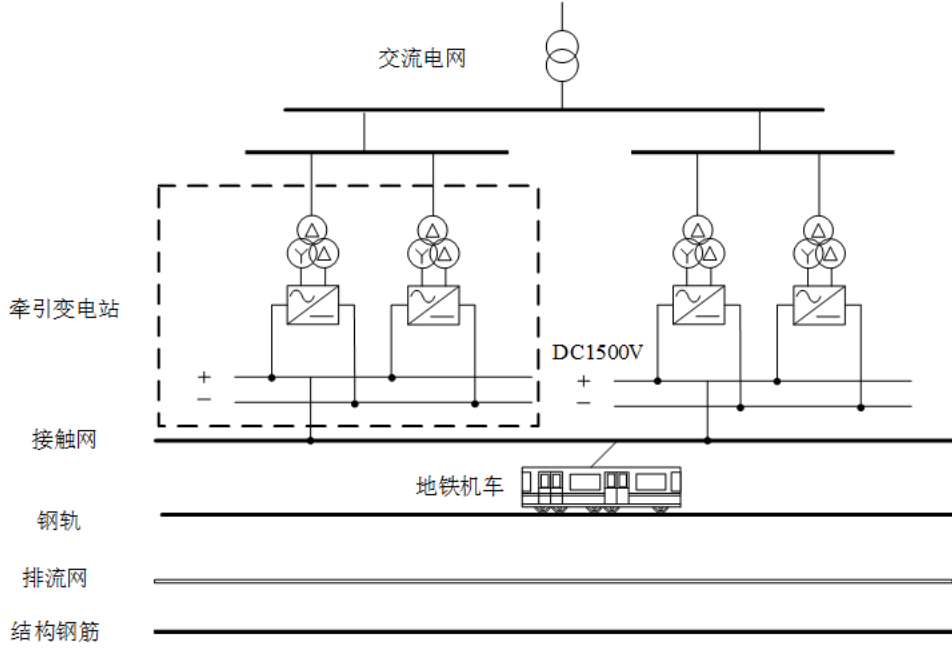
6.3 安装步骤

变压器中性点隔直装置安装应按下列步骤执行：

- a) 根据评估方法，确定受杂散电流影响等级；
- b) 评估等级为一级的变压器中性点安装隔直装置；
- c) 评估等级为二级的变电站，变电站距离城市轨道交通线路小于500m时，变压器中性点安装隔直装置；
- d) 评估等级为二级的变电站，变电站距离城市轨道交通线路车辆段或停车场小于2000m时，变压器中性点安装隔直装置；
- e) 根据变压器中性点隔直装置分布，建立防御策略应用后的城市轨道交通与电网耦合模型，重新评估受杂散电流影响等级，评估等级为一级或二级的变电站应重复步骤b)～d)，否则进入步骤f)；
- f) 形成中性点隔直装置安装。

附 录 A
(资料性)
城市轨道交通与电网耦合模型建立方法

A.1 建立城市轨道交通模型，可按下列步骤执行（图A.1）：



图A.1 城市轨道交通模型示意图

a) 牵引供电系统等效建模过程中，将上下行接触网分别等效为一根纵向直流电阻导体，且导体电阻和半径与实际接触网金属参数一致。将牵引变电站等效为连接接触网和轨道的垂直导体，并在牵引变电站位置设置横向导体，等效牵引变电站母线。

b) 轨道等效建模过程中，将轨道内的两条并联钢轨等效为一根纵向导体。基于两电阻并联电路的电阻计算方法，纵向导体电阻为单根钢轨的1/2，导体截面积为单根钢轨的2倍。上下行线路均流线等效为横向导体，连接上下行纵向导体结构，实现轨道均流。在钢轨导体外层设置厚度为0.01m的涂层，电阻率 ρ_t 满足公式（A.1），其中 R 为钢轨对地的过渡电阻， r_T 为钢轨的半径， L 为线路长度；

$$\rho_t = 2\pi RL \left(1 + \frac{r_T}{0.01}\right) \quad (\text{A.1})$$

c) 排流网等效建模过程中，将上下行线路中的排流网分别等效为一根纵向导体，并将连接上下行排流网的横向钢筋等效为连接排流网纵向导体的横向导体。将每根排流网导线的半径设置为 r_c 米，且 r_c 满足公式（A.2）；将每根排流网导线的单位长度电阻设置为 R_c ，且 R_c 满足公式（A.3），其中 n_p 、 r_p 、 R_{scs} 分别为排流网导体的数量、半径和纵向单位长度电阻。

$$r_c = n_p r_p \quad (\text{A.2})$$

$$R_c = \frac{R_{scs}}{n_p} \quad (\text{A.3})$$

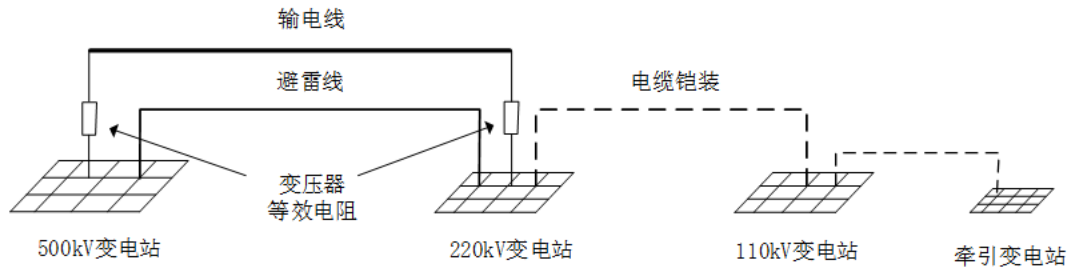
d) 隧道结构钢筋建模过程中, 将上下行隧道内的纵向钢筋等效为一根导体。依据多电阻并联电路电阻计算方法, 将接地系统导线的半径设置为 r_d , 且 r_d 满足公式 (A.4), 将每根排流网导线的单位长度电阻设置为 R_d , 且 R_d 满足公式 (A.5), 其中 n_j 、 r_j 、 R_j 分别为步接地系统导体的数量、半径和纵向单位长度电阻。

$$r_d = n_j r_j \quad (\text{A. 4})$$

$$R_d = \frac{R_j}{n_j} \quad (\text{A. 5})$$

e) 列车等效建模过程中, 每辆机车位置的接触线导线设置电流激励, 同时, 在每辆机车位置的钢轨导线设置方向相反的电流激励, 并将两个电流激励电流设置与机车电流相同。

A.2 建立电网模型, 可按下列步骤执行 (图A.2):



图A.2 电网模型示意图

a) 变电站变压器建模过程中, 500kV变电站主要采用自耦变压器, 变压器通过唯一中性点接地。220kV变电站采用三绕组变压器时, 变压器通过220kV中性点及110kV中性点接地。根据工程测量结果, 500kV自耦变压器高压绕组直流电阻为 $0.238\Omega/\text{相}$, 中压绕组直流电阻为 $0.097\Omega/\text{相}$, 220kV变压器直流等效电阻为 $0.6\Omega/\text{相}$ 。模型采用导体等效变压器各绕组, 导体直流电阻为变压器直流等效电阻的1/3。

b) 变电站接地网建模过程中, 根据变电站接地电阻要求, 电网变电站接地电阻应小于 2Ω 。500kV变电站接地网等效为 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 导体网格, 网格间距为 25m 。110kV及220kV变电站接地网等效为 $200 \times 200\text{m}$ 导体网格。接地网等效导体暴露在土壤中, 导体电阻为 $2\Omega/\text{km}$ 。

c) 输电线路建模过程中, 根据输电线路拓扑及连接结构, 模型将输电线路等效为连接变电站接地主变绕组的导体结构, 导体涂层设置为完全绝缘, 且输电线路电压等级与变压器连接节点电压等级一致。设置输电线路导体电阻为 R_L , 且 R_L 满足公式 (A.6), 其中 ρ_l 为输电线路电阻率, L_l 为输电线路长度, S_l 为单根输电线路截面积, N_l 为输电回数, C 为输电线路分裂数目。

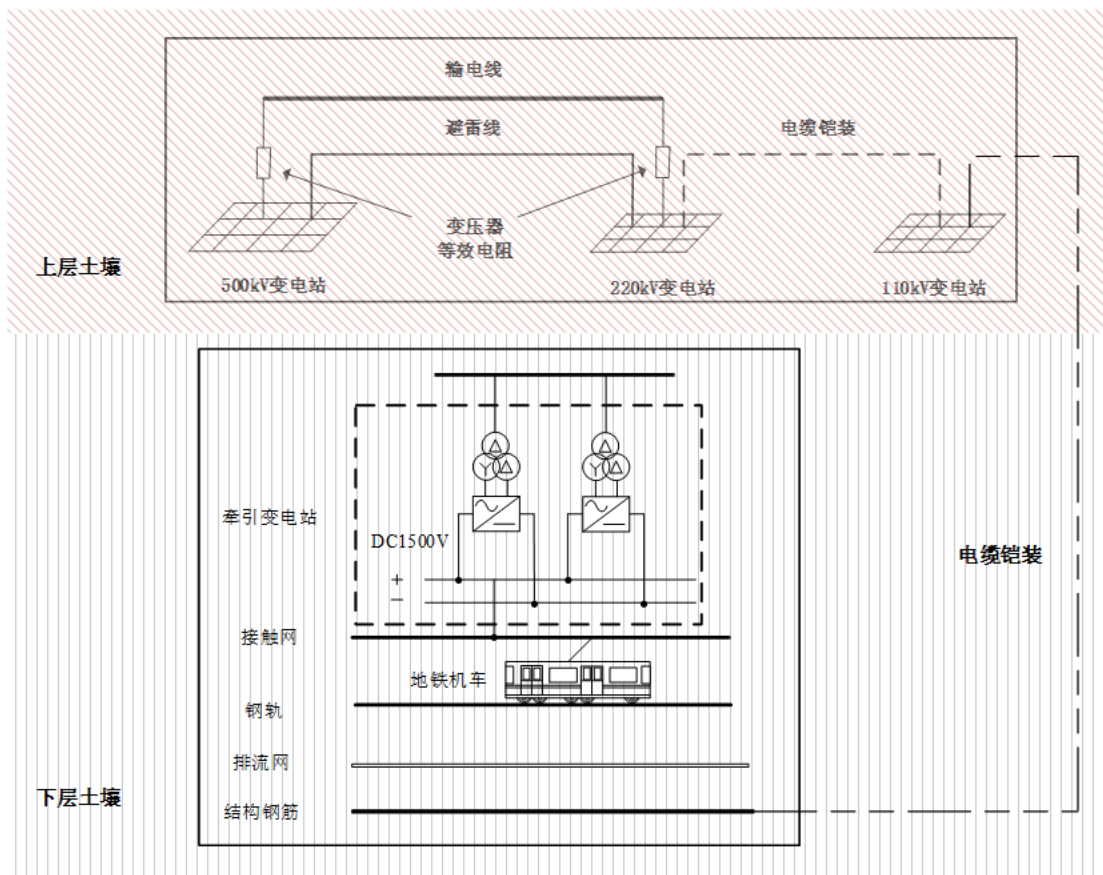
$$R_L = \frac{\rho_l L_l}{3S_l N_l C} \quad (\text{A. 6})$$

d) 架空地线和电缆铠装层建模过程中, 将架空地线和电缆等效为连接变电站接地网的导体, 架空地线和电缆铠装层导体涂层均设置为完全绝缘。针对架空地线, 设置导体电阻 R_w , 且 R_w 满足公式 (A.7), 其中 ρ_w 为架空地线等效导体直流电阻率, L_w 为架空地线长度, S_w 为单根架空地线截面积, N_w 为架空地线导体数量。针对电缆铠装层导体, 设置导体电阻为 R_c , 且 R_c 满足公式 A.8, 其中 R_c 为电缆铠装层金属电阻率; L_c 为电缆长度; r_c 为电缆铠装层半径; h_c 为电缆铠装层厚度; N_c 为电缆数量。

$$R_w = \frac{\rho_w L_w}{S_w N_w} \quad (\text{A. 7})$$

$$R_c = \frac{\rho_c L_c}{2\pi r_c h_c N_c} \quad (\text{A.8})$$

A.3 建立耦合路径模型，可按下列步骤执行（图A.3）：



图A.3 城市轨道交通与电网耦合模型示意图

- 杂散电流流入大地，散布在土壤中。土壤模型包含土壤分层情况和相应土壤电阻率。
- 铠装电缆等效为连接城市轨道交通接地网和变电站接地网的导体，导体设置与A.2 d)一致。