ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ПОДСТАНЦИЙ

А. Л. Вайнер
Харьковский политехнический институт им. В. И. Ленина

1. Заземляющее устройство современной мощной открытой подстанции представляет собой сложную и распространенную систему. Линейные размеры и общая форма этой системы предопределяются компоновкой оборудования на подстанции. Обычно это сетка с прямоугольными ячейками, образованными магистралями заземления, к которой в различных местах присоединены вертикальные заземлители.

Электрические параметры такой заземляющей системы применительно к токам промышленной частоты могут быть доведены до значений, полностью удовлетворяющих любым разумным требованиям. Известные теоретические и экспериментальные исследования и конструктивные разработки отечественных и зарубежных авторов позволяют решать эту задачу в достаточной мере обоснованно.

2. Технические и экономические соображения побуждают использовать заземляющую систему подстанций также для отвода токов молнии. В тех случаях, когда заземления подстанционных молниеотводов выполнены раздельно от общего заземления, последнее отводит в землю лишь относительно небольшие импульсные токи, проходящие через разрядники и защитные промежутки. При нормальных схемах грозозащиты эти токи редко когда превышают 10—12 *ка*, и поэтому стекание их с общего заземляющего устройства не сопровождается возникновением на изоляции подстанционного оборудования опасных импульсных напряжений.

Конструктивно простые решения получаются тогда, когда молниеотводы размещены на опорных конструкциях и общее заземляющее устройство служит также для отвода токов прямых ударов молнии. Однако в таких случаях через заземление подстанции могут стекать очень большие токи, достигающие 100 *ка*, а в исключительных случаях даже 200 *ка*.

Поведение сложных заземляющих систем в этих условиях представляет значительный интерес, но пока еще мало изучено.

3. Расчетные и конструктивные решения по грозозащитным заземляющим системам в первую очередь зависят от распределения импульсного напряжения вдоль системы при том или ином расположении места ввода тока в заземление и от величины, фактически действующей в месте разряда импульсной проводимости растекания заземления.

Что касается единичных заземлителей, находящихся в системе, то, поскольку через каждый из них обычно стекают токи, не превышающие 10—20 *ка*, их электрические параметры известны из литературы и могут быть надлежащим образом учтены.

Основные закономерности и зависимости, определяющие рациональные формы сложных заземляющих устройств для отвода токов молнии, были установлены в первую очередь по опытам на расчетной электрической модели заземляющих устройств, разработанной в Харьковском политехническом институте им. В. И. Ленина и описанной в литературе.

В качестве исходных были приняты следующие параметры заземлителей:

удельное сопротивление земли

$$\rho = (5 - 10) \cdot 10^4 \ ом.см;$$

погонная индуктивность горизонтального заземлителя

$$\Gamma_0 = (0{,}9 = 3\,0) \cdot 10^{-6} \ гн/м;$$

условный коэффициент нелинейности проводимости растекания протяженных заземлителей

$$\beta = 1 \ldots 3.$$

Большая часть опытов была произведена при импульсных волнах тока типа 4/50 и 10/50 *мксек*.

4. Установлено, что любое сложное заземляющее устройство, состоящее из комбинаций горизонтальных и приключенных к ним через равные расстояния верти-

кальных заземлителей, может быть с достаточной точностью представлено цепочечной системой из продольных индуктивностей и поперечных проводимостей (линейных и нелинейных). Обычного типа заземления открытых подстанций представляются в таком случае цепочечной системой в виде сетки. Так как горизонтальные заземлители системы замещаются по схеме «П» или «Т» индуктивностями и проводимостями, присоединенными к концам каждого звена (при $\rho \leqslant 10^6$ *ом.см* емкостями можно пренебречь), то наличие вертикальных заземлителей может быть учтено с помощью соответствующих проводимостей, также присоединенных к концам звеньев. При указанном выше равномерном распределении вертикальных заземлителей вдоль горизонтальных схемой замещения будет та же цепочечная сетка с поперечными проводимостями большей величины.

Заземляющая система в виде сетки может быть расчленена на ряд сравнительно простых звеньев — крестообразно расположенных горизонтальных элементов — «крестов». Подробное исследование распределения напряжений вдоль такого элементарного звена и его действующего импульсного сопротивления при вводе импульсного тока в различные точки «креста» позволило выяснить степень участия каждой ветви звена в отводе импульсного тока, влияние их индуктивности, коэффициента нелинейности на электрические параметры звена и установить отправные положения для перехода к анализу более сложной системы.

5. При любом расположении молниеотводов на открытой подстанции относительно заземляющего устройства, последнее может быть представлено в эквивалентной электрической схеме тремя либо четырьмя связанными «крестами».

В системе три «креста» практически исчерпывающее представление о действующем импульсном сопротивлении растеканию заземляющего устройства дает рассмотрение вариантов нахождения молниеотводов в средних и крайней точках этой системы. Установлено, что наименее благоприятно используется импульсная проводимость растекания элементов заземления при расположении молниеотвода у одной из концевых точек заземления. Обусловлено это большим падением напряжения в

первой ветви и значительной индуктивностью, отделяющей крайние ветви от места ввода импульсного тока, в связи с чем проводимость растекания отдаленных элементов входит в действие со значительным запозданием.

Импульсный коэффициент $\alpha_и$ системы в этом случае чрезвычайно низок. Так, даже при $\rho = 10 \cdot 10^4$ *ом.см*

$$\alpha_и = 8{,}8$$

($\beta = 1$, коэффициенты экранирования при импульсах $\eta_и$ и при токах промышленной частоты $\eta_{\sim}$ приняты равными).

Влияние указанных факторов уменьшается при расположении молниеотвода в средней части системы три «креста». При тех же ρ, β и $\eta_и = \eta_{\sim}$

$$\alpha_и = 2{,}8.$$

В системе, состоящей только из трех «крестов», присоединение к ее концевым точкам сосредоточенных проводимостей растекания (при $\rho \leqslant 10 \cdot 10^4$ *ом.см*) заметно не отражается на импульсном сопротивлении растеканию ($R'_и$), действующем в месте входа волны тока, и на затухании волны. Благодаря этому можно делать обоснованные выводы об импульсных характеристиках сложных заземлений на основе рассмотрения лишь части заземлительной системы — трех или четырех «крестов». Естественным следствием этого является также вывод о малой эффективности использования для грозозащиты энергетических установок естественных протяженных заземлителей, присоединяемых к крайним элементам заземления.

6. Импульсное напряжение, возникающее в какой-либо точке заземляющего устройства, зависит от величины тока, стекающего с заземления, электрических характеристик заземления и координат точки относительно места ввода импульсной волны, т. е. места установки молниеотвода.

Достаточно обоснованы следующие средние значения относительных напряжений.

Точки на заземлении, отстоящие более чем на 20 *м* от молниеотвода, установленного в концевой части подстанции, получают напряжение

$$U_{m_x} < 0{,}3\ U_{o_m}.$$

Точки на заземлении, отстоящие более чем на 20 *м* от молниеотвода, установленного в средней части подстанции, получают напряжение

$$U_{m_x} < 0{,}6\ U_{o_m}.$$

Здесь U_{o_m} — амплитуда волны напряжения на заземлении в месте ввода тока;

U_{m_x} — амплитуда волны напряжения в точке x.

7. Сложные и до некоторой степени противоположные по характеру зависимости между удельным сопротивлением земли и зоной эффективного стекания тока приводят к почти равновесному влиянию этих факторов на $R'_и$, так что при ρ до $10 \cdot 10^4$ *ом.см* (исследованная область) можно говорить о средних значениях $R'_и$ системы из нескольких «крестов», воспроизводящей сложную заземляющую систему, вне зависимости от ρ. При волне типа 4/50 *мксек* расхождения между значениями $R'_и$ при $\rho = 5 \cdot 10^4$ *ом.см* и $\rho = 10 \cdot 10^4$ *ом.см* составляют не более 20%.

Если молниеотвод установлен в средней части подстанции, его можно считать расположенным в центре системы горизонтальных заземлителей три «креста», и тогда действующее импульсное сопротивление растеканию заземления будет находиться в пределах

$$R'_и = 8{,}5 - 10{,}5\ ом.$$

При расположении молниеотвода на краю подстанции (это соответствует разряду в концевую часть системы три «креста») действующее импульсное сопротивление растеканию горизонтальной сетки при тех же значениях ρ, β и t_1/t_2 составляет $R'_и = 24{,}5 \quad 26{,}5$ *ом.*

Из изложенного следует, что снизить импульсное напряжение, возникающее на присоединенных к заземлению элементах оборудования, можно главным образом путем уменьшения импульсного сопротивления растеканию, действующего в районе расположения каждого молниеотвода. Поэтому вертикальные заземлители, обычно применяемые в сложных заземлениях, рационально располагать не вдоль контура, а сосредоточить в районе каждого молниеотвода на первых 10—15 метрах от места входа волны при $\rho \approx 5 \cdot 10^4$ *ом.см* и на первых 20—30 метрах при $\rho \approx 10 \cdot 10^4$ *ом.см.* Такое

своеобразное расположение вертикальных заземлителей на подстанции, не ухудшая качества заземляющего устройства при стекании с него токов промышленной частоты, обеспечит высокую проводимость при стекании импульсного тока.

8. Общие соображения по конструкции современных мощных открытых подстанций иногда вынуждают проектантов располагать молниеотводы на трансформаторных порталах. Импульсное напряжение, которое ложится в этом случае на изоляцию трансформаторов, определяется рядом факторов, среди которых ведущую роль играет величина фактически действующей импульсной проводимости растекания.

При различных вариантах расположения молниеотводов на трансформаторных порталах действующая проводимость растекания рядом находящихся заземлителей, размещенных у соседних стоек портала, определяется величиной индуктивности, разделяющей сосредоточенные группы заземлителей.

В трехстоечном портале действующее импульсное сопротивление растеканию лежит в пределах:

$$\frac{R'_{и_к}}{2} \cdots \frac{R'_{и_к}}{1{,}83}.$$

9. Приведенные результаты исследования являются основой для следующих практических рекомендаций:

а) Для цепей высокого напряжения открытых подстанций следует проектировать одно общее заземляющее устройство в расчете, что оно будет использовано как рабочее и защитное при токах промышленной частоты и для отвода токов молнии (т. е. и как грозозащитное).

б) Расположение заземляющих магистралей следует выбирать, не только исходя из удобства присоединения соответствующих элементов оборудования к заземлению, но и сообразно с местами расположения на подстанции молниеотводов и разрядных устройств. В этих местах следует создать многочисленные пути для стекания импульсного тока (многолучевые системы) и сосредоточить вертикальные заземлители. При соблюдении этого принципа можно получить достаточно высокие проводимости растекания.

в) Естественные заземлители в виде распространенных подземных металлических коммуникаций, используемые на подстанциях, не следует рассматривать как элементы, участвующие в отводе токов молнии.

г) Критерием для оценки качества заземления при отводе токов молнии является фактически действующая величина импульсного сопротивления растеканию. Поэтому при расчете и проектировании сложных заземляющих устройств энергетических установок следует определять величину действующего импульсного сопротивления растеканию для каждого установленного грозозащитного устройства.

д) Сглаженное влияние удельного сопротивления земли на действующее импульсное сопротивление растеканию сложного заземляющего устройства и допустимость оперирования при расчетах с упрощенными системами заземлений позволяют свести многочисленные возможные варианты сложных заземляющих систем к ограниченному количеству типовых заземлений и с достаточной точностью оценить их действующее импульсное сопротивление растеканию.