

# 電力系統的接地保護

蘇聯 И. М. 西洛塔著

水利電力出版社

# 電力系統的接地保護

蘇聯 И. М. 西洛塔著

萬國珍等譯

水利電力出版社

## 內 容 提 要

本書研究中性點不接地或經補償的高壓系統中的單相接地保護問題。

書中講述：在電力系統中消除單相接地故障的理論和一般問題、實現各種形式接地保護的條件、中性點接地方式以及實施和調整保護裝置的基本計算方法等。

本書可供動力系統及設計機構做繼電保護工作的工程技術人員和電力工程學院高年級學生使用。

И. М. СИРОТА

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ИЗД. АН УССР КИЕВ 1955

## 電力系統的接地保護

根據烏克蘭加盟共和國科學院出版社1955年基輔版翻譯

萬國珍等譯

\*

833D304

水利電力出版社出版（北京西郊科學路三里河）

北京市書刊出版業營業登記證出字：105號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

\*

787×1092 $\frac{1}{8}$ 開本 \* 7 $\frac{1}{8}$ 印張 \* 167千字 \* 定價（第10類）1.10元

1958年6月北京第1版

1958年6月北京第1次印刷（0001—4,600冊）

## 目 录

緒 論 .....	3
<b>第一章 小电流接地系统中的单相接地</b> .....	7
1. 接地时电流与电压間的一般关系 .....	7
2. 每公里輸电綫路接地电容电流的計算 .....	12
3. 單相間歇接地 .....	16
<b>第二章 單相接地电容电流的补偿</b> .....	19
1. 精确补偿时的基本关系 .....	19
2. 补偿(消弧)设备的失調 .....	23
3. 补偿设备的实现 .....	25
<b>第三章 电網中接地电流的分佈</b> .....	28
1. 确定电流分佈的一般方法 .....	28
2. 在輻射形补偿电網中确定电流分佈的实例 .....	29
3. 閉式电網中电流分佈的确定 .....	31
4. 閉式电網中电流分佈的实例 .....	36
5. 兩相接地与兩点接地 .....	37
<b>第四章 实现接地保护的基本条件</b> .....	38
1. 对保护装置灵敏度的要求 .....	38
2. 6—35 千伏电網的中性点接地方式 .....	42
3. 保护装置的基本形式 .....	44
4. 各种形式保护装置的应用条件 .....	48
5. 选择保护装置的例题 .....	57
<b>第五章 保护装置的灵敏度</b> .....	62
1. 保护装置中接地电流的变换 .....	62
2. 保护装置的計算 .....	70
3. 計算示例 .....	81
<b>第六章 零序电流互感器(TN)磁路的助磁</b> .....	86
1. 具有助磁的零序电流互感器的構造原理 .....	86
2. 具有助磁的零序电流互感器工作过程的基本概念 .....	90
3. 确定零序电流互感器計算方法基础的解析关系 .....	93
4. 具有助磁的零序电流互感器的实验数据 .....	97
5. 具有助磁的零序电流互感器的計算方法 .....	106
6. 助磁效果的評价 .....	107
<b>第七章 零序电流互感器及零序电流过滤器的不平衡电流</b> .....	110

1.	与零序电流互感器構造無关的不平衡电流的性質	110
2.	几个零序电流互感器的共同联接。由几个單相电流互感器組成的过滤器	115
3.	环形磁路及矩形磁路零序电流互感器的优点和缺点	120
4.	矩形零序电流互感器二次繞組的制作原理	122
5.	矩形电纜零序电流互感器繞組分段的佈置	126
6.	母綫零序电流互感器互感电抗的限制	130
7.	在一次回路中的过渡情况下，零序电流互感器和过滤器的不平衡电流	134
<b>第八章</b>	<b>零序电流互感器的構造。用于接地保护接綫圖中的基本設備的技术数据</b>	<b>136</b>
1.	具有助磁的零序电流互感器的制造	136
2.	無助磁零序电流互感器的制造	143
3.	有关某些繼电器及仪表消耗功率的数据。各型电流互感器的灵敏度及不平衡电流	145
4.	关于兩点接地时零序电流互感器的工作	152
<b>第九章</b>	<b>接地保护的接綫圖及成套裝置</b>	<b>155</b>
1.	發电机定子繞組的保护	155
2.	發电机保护装置基本接綫圖的改进	160
3.	补偿被保护發电机电容电流的影响	163
4.	电網的信号选择性保护	166
5.	繼电器作用于跳閘或远距信号的綫路的选择保护	171
<b>第十章</b>	<b>保护装置安裝及試驗的某些問題</b>	<b>175</b>
1.	單相接地电流的測量	175
2.	关于具有助磁的电纜型零序电流互感器的保护装置安裝及調整的指示	177
3.	关于具有母綫型零序电流互感器的保护装置安裝及調整的指示	181
4.	保护装置接綫圖中不平衡电压的測量	184
5.	关于具有 УЗ, УЗИ 及 РЗ 裝置的綫路保护裝置的安裝及調整的指示	185
<b>附 录</b>		<b>190</b>
<b>主要符号</b>		<b>194</b>

## 目 录

緒 論 .....	3
<b>第一章 小电流接地系统中的单相接地</b> .....	7
1. 接地时电流与电压間的一般关系 .....	7
2. 每公里輸电綫路接地电容电流的計算 .....	12
3. 單相間歇接地 .....	16
<b>第二章 單相接地电容电流的补偿</b> .....	19
1. 精确补偿时的基本关系 .....	19
2. 补偿(消弧)设备的失調 .....	23
3. 补偿设备的实现 .....	25
<b>第三章 电網中接地电流的分佈</b> .....	28
1. 确定电流分佈的一般方法 .....	28
2. 在輻射形补偿电網中确定电流分佈的实例 .....	29
3. 閉式电網中电流分佈的确定 .....	31
4. 閉式电網中电流分佈的实例 .....	36
5. 兩相接地与兩点接地 .....	37
<b>第四章 实现接地保护的基本条件</b> .....	38
1. 对保护装置灵敏度的要求 .....	38
2. 6—35 千伏电網的中性点接地方式 .....	42
3. 保护装置的基本形式 .....	44
4. 各种形式保护装置的应用条件 .....	48
5. 选择保护装置的例題 .....	57
<b>第五章 保护装置的灵敏度</b> .....	62
1. 保护装置中接地电流的变换 .....	62
2. 保护装置的計算 .....	70
3. 計算示例 .....	81
<b>第六章 零序电流互感器(TMI)磁路的助磁</b> .....	86
1. 具有助磁的零序电流互感器的構造原理 .....	86
2. 具有助磁的零序电流互感器工作过程的基本概念 .....	90
3. 确定零序电流互感器計算方法基础的解析关系 .....	93
4. 具有助磁的零序电流互感器的实验数据 .....	97
5. 具有助磁的零序电流互感器的計算方法 .....	106
6. 助磁效果的評价 .....	107
<b>第七章 零序电流互感器及零序电流过滤器的不平衡电流</b> .....	110

1.	与零序电流互感器構造無关的不平衡电流的性質	110
2.	几个零序电流互感器的共同联接。由几个單相电流互感器組成的过滤器	115
3.	环形磁路及矩形磁路零序电流互感器的优点和缺点	120
4.	矩形零序电流互感器二次繞組的制作原理	122
5.	矩形电纜零序电流互感器繞組分段的佈置	126
6.	母綫零序电流互感器互感电抗的限制	130
7.	在一次回路中的过渡情况下，零序电流互感器和过滤器的不平衡电流	134
<b>第八章</b>	<b>零序电流互感器的構造。用于接地保护接綫圖中的基本設備的技术数据</b>	<b>136</b>
1.	具有助磁的零序电流互感器的制造	136
2.	無助磁零序电流互感器的制造	143
3.	有关某些繼电器及仪表消耗功率的数据。各型电流互感器的灵敏度及不平衡电流	145
4.	关于兩点接地时零序电流互感器的工作	152
<b>第九章</b>	<b>接地保护的接綫圖及成套裝置</b>	<b>155</b>
1.	發电机定子繞組的保护	155
2.	發电机保护装置基本接綫圖的改进	160
3.	补偿被保护發电机电容电流的影响	163
4.	电網的信号选择性保护	166
5.	繼电器作用于跳閘或远距信号的綫路的选择保护	171
<b>第十章</b>	<b>保护装置安裝及試驗的某些問題</b>	<b>175</b>
1.	單相接地电流的測量	175
2.	关于具有助磁的电纜型零序电流互感器的保护装置安裝及調整的指示	177
3.	关于具有母綫型零序电流互感器的保护装置安裝及調整的指示	181
4.	保护装置接綫圖中不平衡电压的測量	184
5.	关于具有УЗ、УЗИ及РЗ裝置的綫路保护裝置的安裝及調整的指示	185
<b>附录</b>		<b>190</b>
<b>主要符号</b>		<b>194</b>

## 緒 論

在共产党和苏維埃政权的领导下，苏联人民成功地实行着共产主义建設的偉大任务，在整个国民經济的領域內，特别是动力領域內，都获得了新的生产成就。相当多的發电厂扩建，許多新的大、中、小型發电厂的建設，以及用戶对供电質量要求的提高，都促使我們必須进一步提高技术水平和發电厂、电網运行的可靠性。

为了完成这一重要任务，除了采用其他各种措施以外，还需要在运行中进一步广泛地运用、并熟練地掌握防止动力系統电气部份發生故障的最新型的自动保护裝置(繼电器的和別种型式的)。

在輸电綫、电机繞組和高压电器的各种故障中，最常遇到的是單相接地。例如根据苏联电站部中央电工研究所的資料，电綫網絡中的單相接地故障佔总故障的77%。許多匝間和相間故障也往往是从單相接地开始，或者与它同时發生。

实施接地保护与这一电压的系統中性点接地方式有关。

在欧洲大多数国家里，电压35千伏以下有时也包括110千伏以下的电網，中性点是經過消弧綫圈或大电阻接地的(为了限制單相接地时的过电压，在外国認為采用电阻接地是必要的)。

美国和英国的一部分，許多年間在各种电压的系統中曾主要采用中性点直接接地。可是从四十年代开始，就是这些国家也多半不用直接接地而裝置消弧綫圈了。

在研究电力系統的單相接地和拟制保护單相接地的方法，以及防止單相接地引起过电压的方法中，苏維埃的学者和工程師們起了重要的作用。近几年来所进行的許多研究指出，在小电流接地系統中，为了防止过电压，以前認為必需裝置的电阻是完全沒有必要的。

在小电流接地系統中限制故障范围非常有效的方法是裝置消弧綫圈。莫斯科电業局很早就应用了消弧綫圈(1930年)，其后在許多电力系統中也都采用它，因而很多單相接地都被自动地消除，而穩定的接地几乎不再轉变为相間短路了。

大电流接地电網中的選擇性接地保护，是由保护短路的繼电保护裝置来实现的，所以我們不予討論。



小电流接地系统中的重要元件，在大多数情况下要装设专门的有选择性的接地保护。

外国公司实行的这种保护的原理是 1930 年以前确定的，直到现在还保留着它的主要特点。

对于在母线上工作的发电机的保护，在外国常常利用接地阻抗和余弦型零序功率方向继电器。AEG 公司的所谓“100% 的保护装置”和铁-氢接地阻抗的保护装置曾得到广泛的采用。所有这些保护方式都有本质上的缺点，并且在苏联运行中已经证明这些保护方式是不正确的。

三十年代由苏联拟制的具有不平衡电流补偿的发电机接地保护，比外国的更为完备。直到四十年代末期，直接在母线上工作的发电机还广泛采用具有不平衡电流补偿的保护装置。这种保护装置的原理在于利用三个电流互感器的过滤器和余弦型功率继电器确定零序功率的方向，而发电机的中性点经电阻接地。这种保护装置的重要缺点是，过滤器的不平衡电流较大，因而限制了保护的灵敏度，并且所需要的单相接地电流相当大（往往达到 200 安）。大电流将降低发电机工作的可靠性，使发电机电压的电网运行困难，因为在每次接地时必须将故障线路自动切除。

用消耗功率很小的特种过电流继电器代替功率继电器可使发电机的保护装置大大简化。为了这种目的，苏联电站部电工科学研究所于 1948—1949 年间，曾经根据磁放大器原理制作了过电流继电器。此外，工业中还制造并供应了 ЭТД-551 型电磁式继电器。但是，由于在正常工作情况下过滤器的不平衡电流较大，为了避开这种不平衡电流，保护装置的灵敏度不能有很大的提高。此外，很快就发现了具有过滤器的过电流保护装置的严重缺点：由于系统中暂态过程的非周期性分量使互感器的磁路饱和，因而激烈地增加了过滤器的不平衡电流，而且该电流比产生它的暂态过程的消失要慢很多。

由于这个原因，苏联电站部于 1949 年在发电机保护的接线图中拒绝采用三个互感器的过滤器了。

早在 1940 年，某一动力系统为了达到保护装置所必需的灵敏度，曾经尝试将发电机的外壳全部与地绝缘，并且将外壳经过接到保护继电器的电流互感器接地。这样使保护装置达到了理想的灵敏度：当接

壳电流只有十分之几安时继电器即行动作。但是因为发电机外壳对地的绝缘有时会损坏，使保护装置不能工作，所以这一方法已经证明是不正确的。

某些动力系统在不同时间曾经实现了带零序电流互感器(THП)的保护装置。零序电流互感器具有可以穿过发电机电缆的由变压器钢片做成的环形(一般是圆的)磁路。由于在磁化曲线的起始部份工作，变压器钢的导磁率很小，所以这种保护装置的灵敏度不高。除此以外，采用环状铁心的零序电流互感器，必须将发电机电缆分成几“束”，这就使结构困难。因此这种保护装置也没有在大型发电机上得到广泛的应用。

在战后的年代里，某些发电厂曾经装置过具有变压器钢做的零序电流互感器的保护装置。这种零序电流互感器可穿过发电机的每一根电缆。

虽然这种保护装置曾只在由两三根电缆联接到母线上的不大的发电机上应用，可是这种保护装置的灵敏度比所要求的要小很多。

苏联电站部电工科学研究试验所在1949年曾拟制了类似的接线图。这种接线图具有由坡莫合金做成的零序电流互感器和消耗功率很小的继电器。

曾被广泛采用的这种接线图，达到了可以满足实际要求的高度灵敏度，并且不必使发电机的中性点接地。

乌克兰加盟共和国科学院电工研究所在1948—1949年曾经拟制了高灵敏度的发电机保护装置。这种保护装置具有用普通变压器钢做成的带助磁的电缆型零序电流互感器(或母线型零序电流互感器)和简单型的电磁式过电流继电器。这种保护装置的特点是非常简单而可靠，近年来在很多发电厂已得到推广。

与昇压变压器组合在一起工作的发电机定子绕组的接地保护，也是长时期采用中性点经过电阻接地。随着这种接线图运行经验的积累，发现在上述情况中接地电阻是多余的，甚至是有害的。现在对这种发电机的保护，只限于采用中性点经电压互感器接地。它的二次绕组接到作用于信号的继电器上。

当在小电流接地电网中实现高压线路的接地保护时，在多数情况下也要建立大致几十安的电流，以保证继电器动作。保护装置由三互

感器的过滤器或最简单型的环状零序电流互感器(在电缆上)和过电流继电器做成。在许多情况下或用余弦型功率继电器作用于跳闸。保护装置的这种做法,直到目前在外国还被广泛地应用。

目前在苏联,上述电网的中性点一般都不接地或补偿电容电流运行而不用接地电阻,保护装置作用于信号。为此,苏联电站部电工科学研究试验所与乌克兰加盟共和国科学院电工研究所曾拟制了特殊的继电器和信号装置。这些型式的选择性保护装置,与发电机保护装置不同,它们的运行经验还不很多。在某些情况下,特别是在较短的35千伏电网中还没有能够成功地实现有选择的保护装置。

大型高压电动机和同步补偿器的接地保护,一般与发电机的保护装置同样实现,而受端(降压)变电所内电力变压器绕组的保护则与相应电压级电网的保护装置相类似。

写本书的目的,是想促使在中性点不直接接地系统中进一步运用与发展接地保护。

本书的前五章是叙述单相接地时各电量间的基本关系,阐明接地保护装置的设计与运行所必需考虑的一般问题;其他各章提供了实施保护装置的新方法,而且主要注意力集中在近年来由乌克兰加盟共和国科学院电工研究所拟制的在电力系统中得到广泛应用的保护方式。

在研究所为这项工作所进行的很多实验,都得到工程师 A. B. 奥司脱洛夫司卡娅的积极参加。

熟练掌握新保护装置的生产及其成功地运行,只有在研究所的科学工作者们与制造工厂和动力系统的工程师、技术员以及革新者们的合作下才是可能的。保护装置基本元件——零序电流互感器的大批生产是由乌克兰加盟共和国的基辅电力机械工厂和“联合动力修配厂”于1950—1951年掌握的。母线型零序电流互感器高压部份的试验是在基辅电业局高压试验室进行的。发电机的新式保护装置首先是在基辅电业局的几所发电厂内,在运行工作人员的积极参加下运用的。在莫斯科电业局与莫洛托夫电业局的系统中运用发电机的保护装置时,零序电流互感器的调整方法已经大大地补充和确定了。在拟制与运用具有零序电流互感器的保护装置时,苏联电站部技术司、“热电设计院”和哈尔科夫电机制造厂等单位的工作同志们供给了很多宝贵的资料。

# 第一章 小电流接地系统中的单相接地

## 1. 接地时电流与电压间的一般关系

电力系统中接地电流的大小决定于发电机和变压器中性点接地装置的阻抗及电网的电容。如果电力系统的各个元件没有对地电容，那么中性点不接地时，单相接地电流将等于零。实际上输电线的导线和电机、电器的绕组，在各相之间及各相对地之间总有分布电容。这些电容产生附加电流，在正常工作情况下，附加电流与负荷电流一起在各相之间形成通路；而在单相接地时，这电流也通过大地。

下面我们只研究各相对地之间的电容( $c_A, c_B, c_C$ )，因为接地电流只通过这些电容。

当有一相(例如C相)经电阻 $R$ 接地时，由非故障相经电容 $c_A$ 与 $c_B$ 流入地中的电流将经过与电容 $c_C$ 并联的电阻 $R$ 流到C相(图1)。如果是金属性接地( $R=0$ )，那末电容 $c_C$ 即被短路，因而就没有电流通过电容 $c_C$ 。

不论电阻 $R$ 的数值如何，单相接地电容电流的总和，在线路的始端(如果将电源电容忽略不计)等于零，在线路的终端(假如接地并不是发生在这一线路的终端)也等于零。电容电流的总和随着线路始端(或终端)向故障点 $3$ 靠近的程度而增大。

在下列假定下进行单相接地过程的研究，可以大大简化推演过程，而对最终结果的精确度影响很小：

1. 电源的电动势系统是对称的，不包含高次谐波。
2. 不考虑漏导。

3. 由正常负荷以及接地电流在导线和绕组中所引起的电压降落忽略不计(以后我们只在个别情况下，即当确定复杂网络中的电流分布时，考虑线路的阻抗，参看第三章)。

根据最后一个假定，可以认为接地电流的大小与损坏地点无关。此外，根据这个假定，各段线路或整个电网的分布电容，可以利用一个集中的电容来代替。

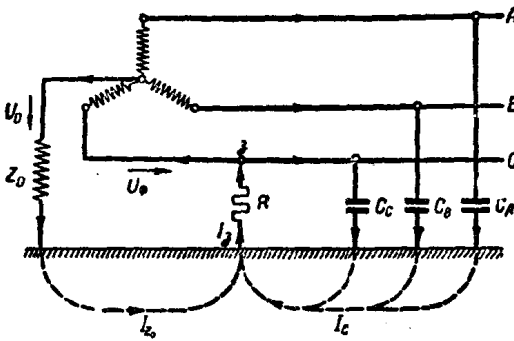


圖 1 系統中單相接地時的電路圖

考慮間歇電弧過程中所引起的情況。

圖 1 表示在電網中經過渡電阻  $R$  單相接地的電路圖。該電網由中性點經阻抗  $Z_0$  接地的電源供電（當有幾個接地裝置時， $Z_0$  代表各接地裝置並聯的總阻抗）。

全部有電氣聯系的綫路、變壓器和電機（其中包括供電發電機）的各相分佈電容以集中電容  $c_A, c_B, c_C$  來代替。

故障點的接地電流  $I_3$ ，可根據等效發電機的原理（赫爾姆霍斯-戴維南）來確定。利用這一原理代替教科書中常遇到的依靠克希荷夫方程式的推導方法，可以更清楚地看出電流  $I_3$  與電容在系統中的聯接地點無關，也可以清楚地看到電機繞組或電器繞組的接地匝數對電流  $I_3$  的影響。

在我們研究的情況中，在沒有故障時接地點 3 的對地電壓等於該相的額定電壓  $U_\phi$ 。除去電阻  $R$ ，系統的等效阻抗為：

$$\frac{\dot{Z}_0}{j\omega(c_A + c_B + c_C)\dot{Z}_0 + 1}$$

確定故障電流  $I_3$  時應該注意到，我們所採用的這一電流的習慣正方向恰好與電壓  $U_\phi$  的正方向相反（圖 1）。所以故障電流等於：

$$\dot{I}_3 = \frac{-\dot{U}_\phi}{R + \frac{\dot{Z}_0}{j\omega(c_A + c_B + c_C)\dot{Z}_0 + 1}} = \frac{-\dot{U}_\phi [j\omega(c_A + c_B + c_C)\dot{Z}_0 + 1]}{R [j\omega(c_A + c_B + c_C)\dot{Z}_0 + 1] + \dot{Z}_0}$$

考慮到系統是對稱的（ $c_A = c_B = c_C = c$ ），可得：

因為我們只是要知道所研究的系統中各個元件兩端的電流數值，而不是元件中間各點的電流數值，所以這樣代替很明顯是許可的。

在以下的討論中將研究穩定的單相接地（ $R = \text{常數}$ ），而只在一節中考

$$\dot{i}_3 = \frac{-\dot{U}_\phi \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right)}{R \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right) + 1} \quad (I, 1)$$

电流  $I_3$  由两个分量组成，即：通过各相电容而形成通路的电流

$$\dot{i}_c = \frac{-\dot{U}_\phi \cdot 3j\omega c}{R \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right) + 1},$$

与通过中性点的电流 
$$\dot{i}_{z_0} = \frac{-\dot{U}_\phi}{Z_0 \left[ R \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right) + 1 \right]}.$$

系统中性点由于接地而引起的偏移电压  $U_0$ ，则由电流  $I_{z_0}$  在阻抗  $Z_0$  中所产生的电压降确定：

$$\dot{U}_0 = - \frac{\dot{U}_\phi}{R \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right) + 1}, \quad (I, 2)$$

如果不是在电网中接地，而是在某一个星形联结的变压器或电机的绕组中接地，当故障点  $s$  与中性点之间的相对匝数为  $b$  (图 2, a) 时，也可以求得与上述类似的关于  $I_3$  和  $U_0$  的方程式。但是因为故障点的电压在故障发生之前等于  $b\dot{U}_\phi$ ，所以这时在公式 (I, 1) 与 (I, 2) 中，电压  $\dot{U}_\phi$  必须用降低了的数值  $b\dot{U}_\phi$  (这里， $0 < b \leq 1$ ) 来代替。所以电压  $U_0$  和电流  $I_3$  均与一相绕组的接地匝数成正比。 $U_0$  和  $I_3$  两数值的变动范围是：由中性点处接地时的零值直到绕组出线端接地时的最大值。

当三角形联结的绕组里发生接地时 (图 2, b)，在求  $I_3$  与  $U_0$  的公式中须引用电压  $b\dot{U}_\phi$ ，其中  $b$  是一个复数。该复数可用下述方法由向量图 (图 2, c) 求得。以  $b'$  表示损坏相绕组的一端与接地点之间的相对匝数 (例如  $C_3$  段的匝数)。在电压向量  $BC$  上 (图 2, c)，由  $C$  点取一线段  $C_3$ ，其相对长度等于  $\frac{C_3}{CB} = b'$ ，然后把点  $s$  与向量图的中心点联结起来。未知的复数乘数  $b$  由向量比  $b = \frac{O_3}{OC} e^{j\beta}$  来确定。很明显，

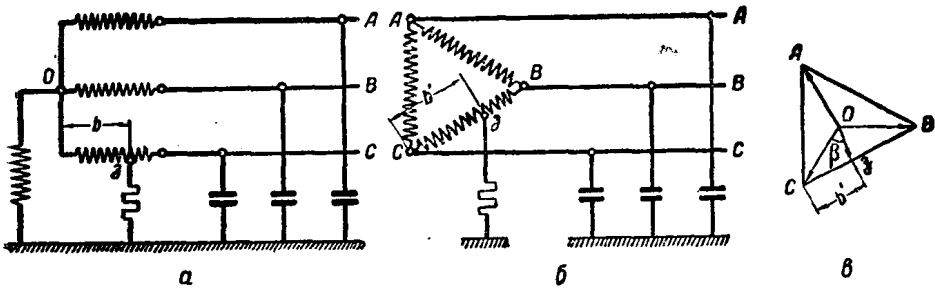


圖 2 在繞組中的單相接壳(地)

这时在  $I_3$  与  $U_0$  公式中的电压  $\dot{U}_\phi$  应该是这样的相电压, 在向量圖中(圖 2, б)綫段  $b'$  落在該电压向量的末端(在我們所研究的例題中, 就是  $C$  相的电压)。

这样, 在一般情况下, 任何形式的对称系統中發生接地故障时, 中性点的偏移电压和总的接地电流都可按下列公式来确定:

$$\dot{U}_0 = \frac{-b\dot{U}_\phi}{R\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right) + 1}, \quad (I, 3)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_c + \dot{I}_{z_0} = \frac{-b\dot{U}_\phi\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right)}{R\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right) + 1}. \quad (I, 4)$$

当綫路上發生故障时, 系数  $b=1$ , 而在某一繞組中短路时, 根据联结方式該系数將等于实数或虚数, 而且  $b \leq 1$ 。电容  $C$  則包括該系統全部有电气联接的元件的电容。

由上述討論可知: 发电机的容量对电流  $I_3$  沒有任何影响。

当發生一相接地时, 系統的相間电压仍維持正常运行情况时的相間电压, 而各相对地的电压則改变数值  $U_0$ :

$$\dot{U}_{A-3} = \dot{U}_A + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_{B-3} = \dot{U}_B + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_{C-3} = \dot{U}_C + \dot{U}_0$$

相电压与中性点电压間的相角差决定于参数  $R, c$  与  $Z_0$  的比例。由公式(I, 3)及(I, 4)可以看出, 电容电流  $I_c$  总是領前电压  $U_0$   $90^\circ$ ; 而通过中性点的电流  $I_{z_0}$  則落后一个角度。該角度的大小决定于中性

点的感抗和电阻的比值。

在中性点不接地的系统中( $Z_0 = \infty$ ), 电压和接地电流分别等于:

$$\dot{U}_0 = \frac{-b\dot{U}_\phi}{3Rj\omega c + 1}; \quad (I, 5)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{-3b\dot{U}_\phi j\omega c}{3Rj\omega c + 1}. \quad (I, 6)$$

在完全金属性接地时( $b=1, R=0$ ), 电压  $U_0$  与中性点有無接地装置无关, 即:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{0n} = -\dot{U}_\phi,$$

而电流  $I_3$  则由两个彼此无关的分量组成, 即: 电容电流

$$\dot{I}_c = -3\dot{U}_\phi j\omega c, \quad (I, 7)$$

和中性点的电流

$$\dot{I}_{z_0} = -\frac{\dot{U}_\phi}{Z_0}. \quad (I, 8)$$

所以

$$\dot{I}_{3.n} = -\dot{U}_\phi \left( 3j\omega c + \frac{1}{Z_0} \right) \quad (I, 9)$$

为了说明上述关系起见, 我们研究一下在中性点不接地的电网中( $Z_0 = \infty, b=1$ )对于接地故障情况所绘制的向量图(图3)。

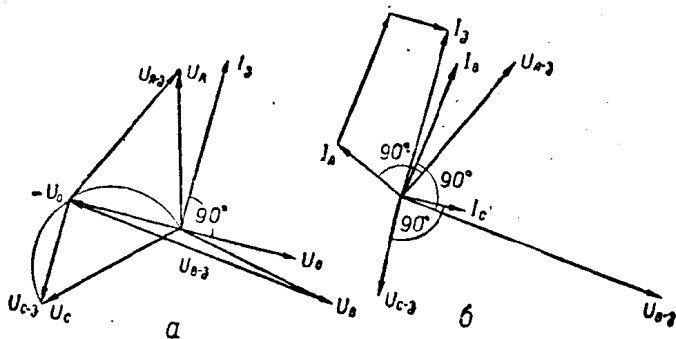


图3 在中性点不接地电网中单相接地的向量图

图3, a 表示中性点和各相对地电压的组成和故障点的电流  $I_3$ 。

图3, b 表示构成总电流为  $I_3$  的各相电流。由第一个向量图可知, 故障点对地电压  $\dot{U}_{c-3}$  系由两部分组成, 即: 该相对中性点的电压  $\dot{U}_c$  和中性点的对地电压



$$\dot{U}_0 = \frac{-\dot{U}_C}{3Rj\omega c + 1}.$$

显然， $\dot{U}_0$  领先  $\dot{U}_{C-3}$   $90^\circ$ 。当  $R$  改变时，向量  $-\dot{U}_0$ （即地对中性点的电压）的末端沿着以  $\dot{U}_C$  为直径的圆弧而移动。当  $R=0$  时，向量  $-\dot{U}_0$  与  $\dot{U}_C$  重合，随着  $R$  的增大， $-\dot{U}_0$  将离开  $\dot{U}_C$  而落后一个角度，其极限值（当  $R \rightarrow \infty$ ）等于  $90^\circ$ 。非故障相对地电压的向量  $\dot{U}_{A-3}$  及  $\dot{U}_{B-3}$  各为电压  $\dot{U}_A$  或  $\dot{U}_B$  与电压  $\dot{U}_0$  的向量和。

由圖 3, 6 可知，电流  $\dot{I}_3$  是由电压  $\dot{U}_{A-3}$ 、 $\dot{U}_{B-3}$  及  $\dot{U}_{C-3}$  所形成的三个电容电流组成的。金属性接地的总电流  $\dot{I}_{3.\pi}$  及其分量  $\dot{I}_c$  和  $\dot{I}_{z_0}$ ，都是在设计继电保护装置时应该考虑的主要参数。

电容电流  $I_c$  可以根据直接测得的系统总电容  $c$  的数值（参阅第十章）或近似地用计算方法来确定（请参阅下节）。

当某一电机或电器的绕组中发生故障时（ $b < 1$ ），或在过渡电阻的影响下（ $R > 0$ ）电压和接地电流减少的相对值按照公式（I, 3），（I, 4），（I, 8）及（I, 9）应该等于：

$$\beta = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_{0n}} = \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_{3.\pi}} = \frac{b}{R\left(3j\omega c + \frac{1}{Z_0}\right) + 1}.$$

在设计继电保护时，为了考虑这种减少的可能性，我们引用下列接地程度的计算系数

$$\beta_p = \frac{U_{op}}{U_{0n}} = \frac{I_{3.p}}{I_{3.\pi}} \quad (\text{I, 10})$$

（或者应用它的倒数，称为灵敏系数）。

式中  $U_{op}$  和  $I_{3.p}$  是在  $c = \text{常数}$  时，电压与电流的最小计算值。

## 2. 每公里输电线路接地电容电流的计算

架空线路各相对地的平均电容（以每公里法拉计），按下列公式计算（所有尺寸的單位都用米）。

沒有架空地线的單迴线路：