

高等学校教学用书

高压工程

第二卷

苏联Л. И. 西洛琴斯基主编

水利电力出版社

高 等 学 校 教 学 用 书

高 压 工 程

第 二 卷

苏联 Л. И. 西洛琴斯基教授主 編
清华大学高电压工程教研組 譯

苏联文化部高等教育司批准作为动力和电工院系教材

水 利 电 力 出 版 社

內 容 提 要

高压工程第二卷是討論高电压裝置的絕緣。書中首先探討了各种过电压，它决定了对絕緣裝置抗电强度的水平及其試驗电压值的一般要求。接着叙述了各种絕緣結構，介紹了綫路用及电器用絕緣子和电容器的計算的基本知識。本書的中間几章，对高压电纜、变压器及电机从絕緣的观点加以討論。在結尾的兩章里，研究了絕緣的預防性試驗問題。

本書可用作高等工業学校动力和电工院系的教科書或教学参考書，亦可供从事于高压工程方面的工程技术人员参考。

ПРОФ. Л. И. СИРОТИНСКИЙ
ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1953

高 压 工 程 第二卷
根据苏联国立动力出版社1953年莫斯科版翻譯
清华大学高电压工程教研組譯

*

1122D322

水利电力出版社出版(北京西郊科学路二號)
北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{8}$ 开本 * 15 $\frac{3}{4}$ 印張 * 338千字 * 定价(第10类)2.40元

1958年9月北京第1版

1958年9月北京第1次印刷(0001—5,100册)

序

因为高压工程第二卷和第一卷一样，基本上应该是普通课的教科书，所以作者和编者对于如何使本书的分量和教学计划相适应感到十分困难。按照电力系的教学大纲，通常给予高压工程普通课的学时数是比较多的，因而大纲的内容就包括本书所叙述到的各种绝缘。然而就是对于这些系来说，本书的分量也还是超出了学生的教学计划所规定的可能学时数。可是我们仍旧认为，削减本书关于绝缘部分的内容，从各方面来说至少在目前看来是不合适的。肯定有这样一种趋势，要加强学生独立钻研书籍的能力。可以这样假定，学生对某一问题感觉有兴趣，于是他就会在严格地完成作业之外，还会愿意扩充该课的知识。这里的补充材料会使他易于实现这种愿望。对于高等学校来说，在教科书内只限于叙述性材料，而没有即使是简短地谈到每种绝缘计算基本知识，这种做法未必是正确的。但是讨论这些就不仅要增加课文，而且还要增加计算参考图表。有时某一些绝缘问题在专门化课程内来探讨，那么这样就可以不必全部阅读本书各章节，而对其他各章节可以多化些注意力了。

最后，我们希望，本书在某种程度上对高电压工程方面的工程师和学生也能利用，当然对于这一类读者来说本书各章内容是不够的。

由于缩减了高电压工程普通课的教学时数，使教研组不再把固体介质的击穿一章放在本书里，教学大纲把这一章分配到绝缘材料课里去了。

各种绝缘距离的计算是根据运行中可能发生的过电压来进行的，这些过电压是用试验电压来模拟的。因此我们认为必须先加入一章总的绪论来简略地介绍各种过电压，说明对绝缘要求、试验电压和通常采用的防护装置之间的关系。过电压及过电压防护问题将在第三册里更充分的加以讨论。

第一章是Л.И.西洛琴斯基所写，第二、三章是А.В.阿尔玛卓夫所写，第四、五章是С.С.果洛捷茨基所写，第六、七章是А.В.潘诺夫所写，第八章是Л.Ф.达玛霍夫斯卡娅所写，第九、十章是П.В.鲍利索格列帕斯基所写。

作者深深感谢С.М.费尔吉克副教授及莫斯科动力学院的电工材料及电缆教研组，他们评阅了本书的手稿。

作 者

目 录

序

第一章 额定电压。绝缘水平和过电压。试验电压	369
1-1. 额定电压	369
1-2. 中性点不接地系统中电弧接地引起的过电压	370
1-3. 中性点接地和绝缘	373
1-4. 各种内部过电压及其幅值与相电压的倍数比	375
1-5. 大气过电压和线路绝缘	378
1-6. 大气过电压和变电所的绝缘	381
1-7. 绝缘配合和试验电压	383
第二章 高电压绝缘子	387
2-1. 关于绝缘子的材料, 特性和试验的概述	387
a) 绝缘子的形式	387
b) 绝缘子的材料	388
b) 绝缘子的电气特性	389
r) 绝缘子的机械特性	390
n) 绝缘子的试验	391
2-2. 线路用绝缘子	395
a) 针式绝缘子	396
b) 悬式绝缘子的形式	397
n) 悬式和棒状绝缘子的结构	398
r) 悬式绝缘子组成的绝缘子串	401
n) 绝缘子串的保护金具	405
2-3. 绝缘套管	411
a) 概述	411
b) 由瓷做成的绝缘套管	412
n) 充油的(油屏障)绝缘套管	414
r) 胶木纸电容器式绝缘套管	421
n) 具有纸-油内部绝缘的绝缘套管	431
2-4. 支持绝缘子	432
a) 概述	432
b) 棒状支持绝缘子	433

в) 針式支持絕緣子.....	435
2-5. 污穢区域用的綫路絕緣.....	438
а) 污穢和它們对絕緣子放电强度的影响.....	438
б) 污穢区域用的特殊絕緣子.....	440
в) 防止污穢絕緣子閃絡的預防措施.....	443
2-6. 絕緣子在直流电压作用下的电气特性.....	444
а) 在直流电压下, 沿絕緣子的电压分佈.....	444
б) 在直流电压下, 絕緣子的干放电电压.....	445
в) 在直流电压下, 絕緣子的湿放电电压.....	446
第三章 高压电容器.....	448
3-1. 概述.....	448
3-2. 紙油电容器.....	450
а) 紙和箔.....	450
б) 浸潤剂.....	451
в) 紙油介質的制造工艺.....	453
г) 紙油介質的耐电强度.....	454
д) 紙油介質的介电系数和介質損失.....	458
е) 計算电場强度.....	460
ж) 电容器元件的結構及其电容量的計算.....	462
з) 电容器的散热.....	464
и) 高压电容器的結構.....	466
к) 电容器組.....	471
л) 电容器的試驗.....	474
3-3. 用膠木紙做的电容器.....	475
3-4. 陶瓷电容器.....	477
3-5. 气体介質电容器.....	480
第四章 高压电纜的材料, 絕緣結構和性能.....	481
4-1. 概述.....	481
4-2. 电纜絕緣的材料和結構.....	483
4-3. 游离和游离击穿.....	490
4-4. 直流电压下电纜絕緣的工作特点.....	494
4-5. 冲击强度.....	495
4-6. 高压力的应用.....	496
第五章 高压电纜的各种型式.....	499
5-1. 粘浸漬电纜.....	499
5-2. 充气电纜.....	505
5-3. 充油电纜.....	512
5-4. 鋼管中充油或充气体的压力电纜.....	519

5-5. 電纜的檢查試驗和補充工廠試驗	523
5-6. 預防性試驗和運行中電纜的檢查	529
第六章 電力變壓器的絕緣	532
6-1. 油击穿時的現象	533
6-2. 水分和纖維的影響	535
6-3. 溫度的影響	537
6-4. 壓力的影響	539
6-5. 電極曲率半徑的影響	540
6-6. 固體絕緣和油配合採用的影響	541
a) 用固體絕緣材料復蓋電極	542
b) 固體材料做成的屏障(隔板)	544
6-7. 變壓器油中沿固體介質表面的放電	546
6-8. 击穿電壓和作用時間的關係	549
第七章 計算油絕緣的試驗數據。電力變壓器的絕緣結構	554
7-1. 50週電壓下油的击穿	554
7-2. 沖擊電壓下油的击穿	557
7-3. 電力變壓器的絕緣結構	562
a) 高壓(BH)繞組對於相鄰繞組和鐵心的絕緣	563
b) 引綫的絕緣	568
c) 套管載流部分和接地零件之間的絕緣	571
r) 縱絕緣	573
第八章 高壓旋轉電機的絕緣	577
8-1. 概述	577
8-2. 定子繞組絕緣所採用的主要材料	578
8-3. 定子繞組的絕緣結構	580
a) 絕緣類型	580
b) 消除電暈的措施	583
c) 30 千伏及 30 千伏以上的發電機定子繞組的絕緣	586
r) 定子繞組絕緣的電氣特性	588
8-4. 旋轉電機絕緣的試驗	591
第九章 高壓絕緣的預防檢查方法	597
9-1. 概述	597
9-2. 介質的極化及預防檢查	598
9-3. 估計潮濕程度的電容法	601
9-4. 根據 $\text{tg}\delta$ 進行的絕緣預防檢查	602
9-5. 根據絕緣的直流電阻進行的預防檢查	603
9-6. 電壓分佈法	604
9-7. 局部放電法	604

9-8. 倫琴射綫 (X 射綫) 透視法	607
9-9. 超声波法	608
9-10. 吸收法	609
9-11. 耐压試驗	610
9-12. 絕緣子預防檢查的特点	612
9-13. 变压器主絕緣的預防檢查的特点	613
9-14. 旋轉电机絕緣的預防試驗	616
第十章 預防性試驗量測用的仪器、設備和試驗	619
10-1. 高压电桥	619
10-2. 用来量測介質損失的瓦特計裝置	622
10-3. 用于量測电压分佈的仪器——測桿	623
10-4. 絕緣內部局部放电指示器	625
10-5. 按照充电-放电循环量測电容的結綫	627
10-6. 綫路損伤脉冲探測器	628
10-7. 电綫內击穿处所的查明	636
10-8. 超音波探伤器	637
附录	639

第一章 額定电压. 絕緣水平和过电压. 試驗电压

1-1. 額定电压

電能的傳輸和分配是在不同的額定电压——也就是平均的运行电压下实行的。每一个額定电压有自己的絕緣等級。而絕緣等級則决定于試驗电压。

在資本主义国家里，由于自由竞争，額定电压的数目和絕緣等級多到这样程度，从一个电压过渡到另一个，或从一級过渡到另一級时，电压改变只有20%。对于給定的电压，这就可以采用較高或較低的絕緣等級，看使用这些裝置的機構的願望，看他們願意保証更高的可靠性呢还是为了能降低基本建設費用而去稍稍冒絕緣損坏的危險。在苏联的有計劃的社会主义經濟中，有可能大大地限制額定电压数目。电压之間采用較大的間隔，从而使生产方便和成本降低。額定电压間較大的間隔要求給定的額定电压和一定的絕緣等級有紧密的联系。但是对于相对說来不高的額定电压(3—10千伏)規定两种絕緣等級，它們可以称为“正常的”(对于給定的額定电压)或“減弱的”。这种对于同一額定电压裝置的絕緣加以不同的处理，从裝置可能处于不同运行条件証明是正确的。選擇絕緣不仅要考虑長時間作用着的額定电压，也要考虑短時間大幅值的过电压。特别是，大气过电压經过架空綫路对絕緣产生作用的可能性，它基本上决定了对于設備絕緣的要求。而3—10千伏电压的裝置可以完全沒有架空綫；或者它有着很大的電纜網。从大气过电压来看，電纜網絡內有几条架空綫对于絕緣不会有任何严重的作用。这些設備的运行經驗指出：对于它們的絕緣水平可以比同一額定电压，但網絡主要是架空綫的裝置的絕緣的要求低些。降低这些电压的裝置的絕緣要求有着重大的經濟論据。同时，由于这些裝置并不受到大气过电压的作用，运行的可靠性也是完全可以得到保証的。降低絕緣要求的巨大意义，不仅仅是因为發電机、电动机和其他具有繞組的設備的价格很大程度上和絕緣要求有关，而且还因为此时可以采用較紧凑的配电設備(例如封閉型的)、較便宜的量測儀器、空气式变压器(無油的)。同一額定电压下(3—10千伏範圍內)有兩個絕緣等級的存在，並不使工業上發生困难，因为很多較低額定电压的“正常”絕緣元件也可以用作較高額定电压的“減弱”絕緣。苏联所規定的額定电压列如表1-1。

高于 1000 伏的額定电压

表 1-1

千 伏 等 級	3	6	10	20	35	110	154	220	400
---------	---	---	----	----	----	-----	-----	-----	-----

220 千伏以下額定电压的裝置在运行中允許 15% 的長時間电压升高。在電網

負荷很大或過負荷時，這就保證了遠處用戶的正常運行電壓。對於 400 千伏的裝置，經濟和技術上合理的能量傳輸是在電源到用戶間電壓差較小的情形下實現的。最大的長時間允許電壓規定為 420 千伏，也就是長時間電壓昇高的可能性規定總共為 5%。

在決定一定的額定電壓絕緣所必需的要求時，長時間允許的電壓值就具有明顯的意義，因為某些類型絕緣的耐電強度和電壓作用時間有很大關係。例如，加長電壓作用時間，粘浸潤電纜、紙電容套管或電容器的耐電強度很快降低。絕緣的這些性能要求降低計算電場強度到一定數值；在這個電場強度值內，絕緣在最大允許電壓長時間作用下也能保持恒定的耐電強度。在估計絕緣性能的某些其他情況下，考慮長時間作用的最大電壓也是重要的；但是，一定額定電壓所要求的絕緣水平仍然主要不決定於這些長時間作用的電壓，而決定於絕緣在運行條件下所要承受的短時間過電壓。這些過電壓之所以有重要作用是因為過電壓的值相當大，並且所有類型絕緣的击穿電壓直接決定於所加電壓的幅值。過電壓分兩類：大氣的（外部的）和操作的（內部的）過電壓。大氣過電壓是由於雷電直接击中架空綫路發生的，或者是由於感應而產生的，即在導綫附近雷雲對地放電時，在導綫上感應出波來。從絕緣觀點來看，直接雷击過電壓有着最大的意義。

內部電壓的升高，發生在電機、變壓器或輸電綫投入和斷開的正常操作過程或是在出現事故的時候——相間短路和對地短路、斷綫、對地電容的對稱被破壞、在基本頻率和諧波作用下的諧振過程。

1-2. 中性點不接地系統中電弧接地引起的過電壓

各種不同形式的內部過電壓中，中性點不接地系統里一相電弧接地所引起的電壓升高值應特別注意。這樣的接地使接地相的電位降低到零，但實際上並不改變相間電壓的三角形。接地的相稱為故障相，而三相系統的其他相則稱為完好相。當故障相接地時，完好相的電位在穩定狀態下將升高到綫電壓值。中性點的

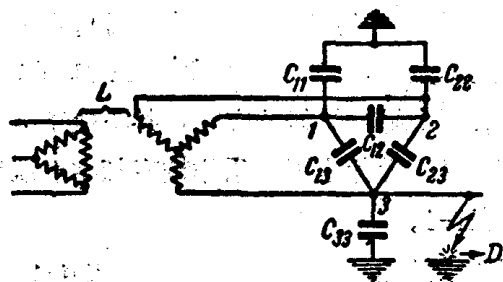


圖 1-1 簡化了的等值電路圖。綫路電感設為零
 C_{11} — C_{22} — C_{33} —對地電容； C_{12} — C_{23} — C_{31} —導
 綫間電容； L —換算到高電壓的漏磁電感； D —電弧
 接地。

電位將達到相電壓的值。從系統的正常狀態（各相的電位等於相電壓，中性點的電位等於零）過渡到故障相接地的狀況是通過衰減振盪來完成的。它的頻率決定於系統的电感和電容。如果一相接地，使流經短路點的電流形成一個金屬迴路（不是電弧迴路），則過渡過程很快衰減（在半週內），而在完好相上將達到的電壓幅值，大約比對地綫電壓穩定值大

25%。設相3的接地(圖1-1)是發生在該相最大負電壓值的瞬間;也就是發生在三相系統中相間電位差等於 $1.5U_\phi$,完好相對地電容的電位是 $0.5U_\phi$;電容 C_{13} 和 C_{23} 上的電位差等於 $+1.5U_\phi$ 的時候。接地的時候,完好相的電位趨向於 $1.5U_\phi$;也就是說完好相的對地電容 C_{11} 及 C_{22} 應該添加電荷。這些添加的電荷是由在變壓器電動勢作用下流過其繞組的電流產生的。這時(故障相電容 C_{33} 對地短路)對地電容 C_{11} 及 C_{22} 分別和電容 C_{13} 和 C_{23} 平行聯接(除了變壓器電感之外,經過被忽略的不大的導線電感)。這樣的聯接促使並聯電容上電位一致。完好相的電位瞬間達到

$$U = \frac{0.5U_\phi C_{11} + 1.5U_\phi C_{13}}{C_{11} + C_{13} \textcircled{1}}.$$

如果 $C_{11} = 4C_{13}$,則 $U = U_\phi \frac{3.5}{5} = 0.7U_\phi$.

這時開始幅值為 $1.5U_\phi - 0.7U_\phi = 0.8U_\phi$ 的振盪過程;而最大電位值(不考慮衰減)達到 $U_m = 1.5U_\phi + 0.8U_\phi = 2.3U_\phi$ 。漏磁電感和電容的振盪週期比正常頻率的週期小很多,在正常頻率的半週期中振盪就衰減了。因為時間很短和幅值不大,這樣的過電壓對絕緣是不危險的。但是,高壓裝置中的對地短路一般不是金屬的,而是電弧接地。當電弧電流經過零值,電弧的不穩定性可以導致電弧電流的中斷以及在更高電壓時的重燃。隨同這樣的過程,可能在完好相上出現 $3-4U_\phi$ 的電壓;同時,過電壓的持續時間不只限於半週期的一部分。在對維持電弧有利的條件下,過電壓可以延續到比較長的時間。必須指出,所討論的這種過電壓將分佈到整個電網內,而不限於電網的個別綫段(像在大气過電壓下所發生的那樣),所以過電壓容易找到絕緣中的弱點,引起新的接地(兩點接地);並且隨之就引起斷開電路所造成的過電壓和其他促使電壓升高的過渡過程。當然,不是任一電弧接地都會使過電壓達到極限值。但是從中點不接地高壓網的運行經驗得出如下結論:如果接地電流($I_g = 3\omega C_{11}U_\phi$)在6—10千伏電網中超出30安,在35千伏或更高電壓的網中超出5—10安,必須用適當的形式把中點接地。應該指出:不大的電流值 I_g 以及同不大電流相關連的電弧不穩定性是過電壓幅值由 $2.3U_\phi$ 增到更高值的條件。相反的,大電流 I_g 使電弧穩定,過電壓比較小。但是,由於一些以後要提到的原因,這樣的電流是不能允許的。

從過電壓發展觀點來看,給定了最有利的接地電弧性能之後,就不難決定中點不接地時過電壓的最大可能值。討論金屬性接地過程時,我們假設:完好綫上發生的振盪是不中斷的,但是逐漸衰減的。在電弧短路時,振盪的交變電流可以在其零值附近中斷。經過接地點,也流過50週電流。但是由於 $\frac{\omega}{\omega_k}$ 值小(ω_k 是振盪電流頻率),它的值和振盪電流相比並不大,因而也可以沒有大錯誤地認為,

① 原書為 C_{12} 可能是 C_{13} 之誤。——編者註

电弧在振盪电流經過零值的瞬間熄灭。我們看到：相当振盪电流零值的电压幅值可能等于 $2.3 U_{\phi}$ (不計第一半波的衰減)；因此，电容 C_{11} 的电荷將是 $Q = 2.3 U_{\phi} C_{11}$ ，在第二根完好导綫的电容 $C_{22} = C_{11}$ 上也有同样多的电荷。电弧的熄灭可能使綫和地分开。电弧熄灭之后，剩余的电荷 $2Q$ 將平均地分配到所有 3 个导綫对地电容上。于是整个电綫的电位(即中性点)升高到 $2.3 U_{\phi} \times \frac{2}{3} \approx 1.5 U_{\phi}$ 。变压器电动势的改变將重新分配电容間的电荷。各相的实际电位將这样决定，就是在电位 $\frac{4.6}{3} U_{\phi}$ 上叠加变压器电动势正常情况下在导綫上产生的电位。⁹ 例如，接地之后过了半週期，变压器电动势由 $+1.5 U_{\phi}$ 改变为 $-1.5 U_{\phi}$ ，在正常状态下它相当于完好相上 $-0.5 U_{\phi}$ 电位，故障相上的电位是 $+U_{\phi}$ 。因此，完好相的电位將是 $\frac{4.6}{3} U_{\phi} - 0.5 U_{\phi} \approx U_{\phi}$ ，而故障相的电位 $\frac{4.6}{3} U_{\phi} + U_{\phi} \approx 2.5 U_{\phi}$ 。后一电位比正常的大很多。如果电弧通道在这瞬間的耐电强度(电流中断之后約 0.1 秒)恰好是 $2.5 U_{\phi}$ ，电弧可能重燃，故障相导綫將对地短路。变压器的电动势企圖向电容 C_{11} 及 C_{22} 傳送电位 $-1.5 U_{\phi}$ ，而在这些电容上存在的电压是 $+U_{\phi}$ 。这一显著的电压差別自然会在“稳定”值 $-1.5 U_{\phi}$ 附近引起强烈的振盪。同时發現导綫間电容在这时候起着略微降低过电压的影响。接地之后， C_{11} 和 C_{13} 的平行联接使电位达到(当 $C_{11} = 4C_{13}$)

$$\frac{U_{\phi} C_{11} - 1.5 U_{\phi} C_{13}}{C_{11} + C_{13}} = \frac{2.5}{5} U_{\phi} = 0.5 U_{\phi},$$

而过电压(不計衰減)將达到 $-1.5 U_{\phi} + (-1.5 U_{\phi} - 0.5 U_{\phi}) = -3.5 U_{\phi}$ 。进行类似的討論，并且再次假設电弧恰好在完好相最大电位的瞬間熄灭，而在故障相电压最高时(半个週期以后)重燃，則过电压將进一步增加，但是升高得慢了而且趋向一个極限。在故障相上电压升高也趋向一个極限。如果，电弧旧通道的耐电强度由一个半週期到另一个半週期都在增加着，終于超过了这極限值时，电弧最終將熄灭。相反，如果耐电强度稳定在一个比極限值更低的值(弧的距离不变，外界冷却条件不变)，則完好相上的过电压也不会达到理想的極限而是稳定在較低的值。

假設半週期前后的过电压在数值上相同，而符号相反(过电压的符号和引起过电压的变压器电动势符号相同)，我們来求过电压的極限值。在稳定状态 ($1.5 U_{\phi}$) 上叠加稳定电压及起始电压的差值就得極限值 U_n 。为了顧到高频振盪的衰減，这差值应乘 $e^{-d} \approx 1 - d$ ($d \approx 0.8$)。

$$U_n = 1.5 U_{\phi} + \left[1.5 U_{\phi} - \frac{-\frac{2}{3} U_{\phi} C_{11} + 0.5 U_{\phi} C_{11} + 1.5 U_{\phi} C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \right] (1 - d).$$

我們注意到， U_n 的符号和 $0.5 U_{\phi} C_{11}$ 及 $1.5 U_{\phi} C_{12}$ 的符号相同，而中性点上电压 ($-\frac{2}{3} U_n$) 的符号和 U_n 相反。

經過簡短的換算之後得

$$U_n = 3U_\phi \frac{2.5C_{11} + 1.5C_{12} - C_{11}d}{C_{11} + 3C_{12} + 2C_{11}d}.$$

在故障相上的極限過電壓等於

$$(U_n)_\phi = \frac{2}{3}U_n + U_\phi = 3U_\phi \frac{C_{11} + C_{12}}{0.5C_{11} + 1.5C_{12} + C_{11}d}.$$

令 $C_{11} = 4C_{12}$, 得 $U_n \approx 3.65U_\phi$, 而 $(U_n)_\phi = 3.5U_\phi$.

我們指出, $C_{11} = 4C_{12}$ 的關係對應於比較高的電壓, 約 110 千伏。對於 35 千伏以下的電壓, 平均值 C_{11} 相當 $3C_{12}$, 極限電壓將相應的降低。如果考慮到所求得的是極限值, 而這種值只在有利於過電壓發展的各因素恰相配合的很少有的情形下才可能出現, 那麼約 $3.5U_\phi$ 的值是並不很大的, 因為以後要看到的其他幾種過電壓將達到 4 甚至 $4.5U_\phi$ 。電弧接地時, 過電壓對於絕緣的危險主要是由於它的可能很長的持續時間以及它能廣泛包括一切有電氣連接的電網, 其中也包括所有配電裝置。此外, 在總長度較長的高壓網絡內, 對地短路電流 ($I_s = 3U_\phi \omega C_{11}$) 將達到這樣大的數值, 致使接地電弧變成非常長, 並且容易過渡到相鄰的相而引起兩相短路。長時間流經接地點的大電流將在接地點產生高電位以及電位差, 從處在接地點附近的人的危險性的觀點來看, 這些高電位是不能允許的。

1-3. 中性點接地和絕緣

這些情形引導到一個結論: 高電壓裝置應該以這種或那種形式將中性點接地, 以消除一相接地引起的長時間過電壓的可能性。從絕緣觀點來看, 兩種中性點接地形式最有興趣: 變壓器中性點經過調好的電感接地和直接接地。中性點接入阻抗 $\omega L = \frac{1}{3\omega C_{11}}$ 的電感 L 使接地點的電容電流吸收到電感 L 中去。接地點的電流降到不大的剩餘值, 剩餘值由“失調” $\left(\omega L \neq \frac{1}{3\omega C_{11}}\right)$, 諧波及損耗所決定。這種剩餘電流很容易在第一次經過零時熄滅, 而由於故障相上電壓(只到 U_ϕ)升高得慢, 也不會發生重新點燃。緩慢的上升是由於故障相電動勢上疊加電感 L 及電網電容 $3C_{11}$ 的自振盪而造成的。在理想的調整下 $\left(\omega L = \frac{1}{3\omega C_{11}}\right)$ 和 $\omega_k L = \frac{1}{3\omega_k C_{11}}$, 頻率 ω 和 ω_k 相等。由於在衰減振盪上疊加了電動勢, 致使故障相上電壓恢復緩慢, 如果電弧通道的击穿電壓這時超過 U_ϕ , 則就阻止了電弧重燃。中性點經過調整的電感接地並不消除完好相在短路之後瞬間的電壓升高, 但是像我們所看到的, 此時過電壓被限制在 $2.3U_\phi$ 值以內。理論上, 如果在 U_ϕ 之下有可能重新燃點, 例如接地物體(木料)靠近故障導線的時候, 這樣的過電壓值也可能是長時間的。在實際情形下, 中性點經過調整的電感接地時, 電弧接地的過電

压不会超出 $3U_\phi$ 的范围。而特别重要的是过电压常常持续不久。在極大多數的情形下，經過电弧的接地在半週期的時間內就熄滅了。用戶甚至还不知道發生過接地。

在所謂中性點直接接地時，發生的情況就根本不同了，這時所有的或多數的變壓器的中性點直接和變電所的接地相連結（經過接地裝置的電流的分散電阻應該等於約 0.5—1 歐）。顯然地，在這些條件下，一相接地就會導致短路，快速作用的繼電保護將迅速斷開損壞段。因此电弧接地過電壓的可能性也消除了。此外，從其他內部過電壓對於絕緣要求的觀點來看，以及從大氣過電壓的觀點來看，直接接地也是很有利的。

中性點經過調整的電感接地時，在發生可能比較長時間存在的一相接地的情形下，還可能有操作過程。此時，從完好相斷開電容和電感是在線電壓下進行的。大氣過電壓的波也會在保護絕緣的避雷器受到線電壓作用的瞬間加到避雷器上去。以後當討論大氣過電壓對絕緣的作用時，我們將看到：避雷器的保護作用與在工頻電壓作用下流過的電流熄滅的瞬間避雷器所受到的電壓直接有關。對於中性點經過調整電感接地的系統，這一電壓是線電壓。

像大家所知道的，直接接地系統中，一相接地時，不接地相的電壓，和零序電抗與正序電抗的比值有關（為了簡單起見設 $X_1 = X_2$ ）。現代的中性點直接接地的高壓網中，一般 $X_0 = (2-3)X_1$ ，且不超出 3.5。在一相接地時，不接地相的電壓和相電壓的比值 $|k|$ ●

$$|k| = \left| \frac{(a^2 - a)X_2 + (a^2 - 1)X_0}{X_1 + X_2 + X_0} \right|.$$

取 $X_0 = 3.5X_1 = 3.5X_2$ ，得：

$$|k| = \left| \frac{-j\sqrt{3} - 3.5\left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{5.5} \right| \approx 1.3.$$

換句話說，直接接地時避雷器上電壓只是採取調整電感時電壓的 $\frac{1.3}{1.73} = 0.75$ 倍。實際上由於避雷器離接地点遠以及接地点有不小的電阻存在，電壓有可能升高一些，所以防護變電所裝置絕緣免受大氣過電壓侵襲所要求的水平，在直接接地的情形下等於經過調整電感接地時所需要水平的 0.8 倍。從很高電壓的觀點來看（110 千伏或更高），當直接接地時，操作的過渡過程（如電容和電感的斷開）也是在更有利的條件下進行的（在相電壓而不是線電壓的作用下）。以上的論述說明了中點直接接地大大降低了對於變壓器、電器和其他高電壓變電所設備的絕緣要求●。對於 110 千伏及更高電壓的裝置來說，裝置的價值隨着對絕緣的要求很快

● 電工手冊，蘇聯國立動力出版社 1952 年版；中譯本 880 頁表 42-2。

● 絕緣水平實際上和中性點接地方法沒有關係。

增加，这种降低絕緣要求的可能性具有重大的經濟意义。另一方面，中性点直接接地也有缺陷的一面。一相接地会引起破坏并联工作的短路。必須把受損部分断开，随着而来的則是連用戶也可能被断开。接地电流值很大，能在通訊綫上引起危险的电压。就是由于这些中性点直接接地的不良性能成为中性点經過調整电感接地系統存在的原因。

近代各处采用速动开关，以及經過短時間間隔(0.2—0.3秒)后自动重合絕緣暫時閃絡的綫段，实际上消除了直接接地的重大缺点，而它的經濟优点(在高压时)提升到首要地位。因此，苏联所有 110 千伏或更高电压的裝置采用中点直接接地。應該指出，在德国和瑞典也出現改变 220 千伏中性点經過調整电感工作的系統成为中点直接接地工作的情形。380—400 千伏的綫路到处用中点直接接地。

1-4. 各种内部过电压及其幅值与相电压的倍数比

中性点接地(这一种或那一种形式)消除了長時間較高幅值的过电压。从絕緣水平选择的观点看，各种短時間的内部过电压就突出到首要地位了。可以举出四种可能發生的具有代表性的过电压形式：

- (1) 在迅速断开流經电感中电流的条件下，断开电感迴路时的过电压；
- (2) 断开电容及無負荷綫路时的过电压；
- (3) 在不对称短路时沒有縱橫阻尼繞組的發电机發生諧波所造成的諧振型过电压；
- (4) 不同形式的鉄諧振过电压。

我們將不來詳細地討論上列各种过电压的實質，而只說明它們可能有的幅值及持續時間。

1. 从对于絕緣的作用来看，那些断开电感的过程有着重要意义，此时迅速断开电感的电流將釋放出磁場能量 $\left(\frac{Li_0^2}{2}\right)$ ，由于附近沒有足够的电容来吸收这些能量，以致引起过电压。空载变压器的断开是具有代表性的，它的自电容总共只不过几百或几千微微法，而它的电感却这样大，以致几安或几十安电流的突然切断將导致極严重的过电压。通常，被切除繞組的額定电压愈高，过电压就愈低。在很少的情形下，对于 35 千伏以下的电压級，过电压值会达到 $(7-5)U_\phi$ ，其中較高的数值相当于 3—6 千伏的电压。

对于 110 千伏及以上的电压，中性点接地有很大的意义。在中性点直接接地的情形下，过电压很难超出 $(3.5-4)U_\phi$ 。在大多数的情形下，它們不超出 $3U_\phi$ 。在經過調整电感接地的情形下，各相的不同时断开以及和它对应的振盪能导致更高的过电压。但是，一般不超出 $(4-4.5)U_\phi$ 。这些过电压的持續時間不超过半

週期的一部分，因为切断之后振盪迅速衰減。

空載变压器的断开过程画在圖 1-2 內。变压器用漏磁感抗 L 、互感 $M \gg L$ 和

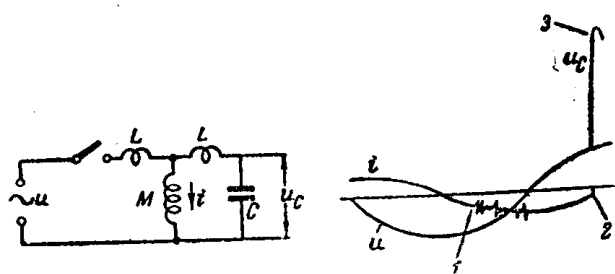


圖 1-2 断开空載变压器的电流

1—触头开始分离；2—开关中电流的切断；3—变压器上的过电压。

自电容 C 所組成的等值电路表示。在过程开始时，开关触头分离并不使电流完全中断，因为被切断电流很大的磁能迅速地提高电容 C 的电压，使接触間隙重新短路，这时还不需要很高的电压。随着电弧的重复切断和点燃而来的是电感 L 和电容 C 的高頻振盪。按照触头分离的程度，

为了击穿这間隙所需要的电压就增加，最后达到电流完全断开，这一电流 i_0 的全部切断將引起过电压 $U_n = i_0 \sqrt{\frac{M}{C}}$ 。开关內电流 i_0 切断之后，电容 C 对变压器 ($M \gg L$) 比較緩慢地放电。磁能 $\frac{Mi_0}{2}$ 经过畸变(鉄饱和)和强衰減(鉄內損耗)的振盪而消失。

在有汞弧整流器的裝置內可能發生巨大的过电压。由于陰極和陽極間失去电导，大电流(几百安或更大)突然切断，在变压器繞組上引起过电压，它被放电器限制到对絕緣沒有危險的值。

限制电流的熔断器所引起的电压升高也屬於这类过电压。当电流約达几百和几千安时，金屬的熔融和金屬蒸气的冷却都是快到这样程度，以致短路迴路电感中釋放的能量將足够在电容上产生过电压，它击穿熔断器的火花間隙。此后，电弧由于熔断器中填料的冷却而安全熄灭。利用結構上的措施(熔絲截面分級)，可以把过电压限制在 $3.5U_0$ 值之內。

2. 切断电容器組及切断和电容相似的空載綫路时所引起的过程和上述情形大不相同。比所加电压領先 90° 的不大的电容电流在电流接近自己的零值，高电压开关触头分开的时候就被切断了(圖 1-3)。恢复电压值小(在电容上有滯后电压和电源正弦电压在最大值附近变化緩慢)以及电流切断之后間隙內殘留的游离比較弱，將促进电流在零值附近切断。

通常，各种类型的高电压开关是在触头分离开始后电流第一个零值附近切断几十安的电容电流，在电容上剩下接近 U_n 的电压 u_0 。

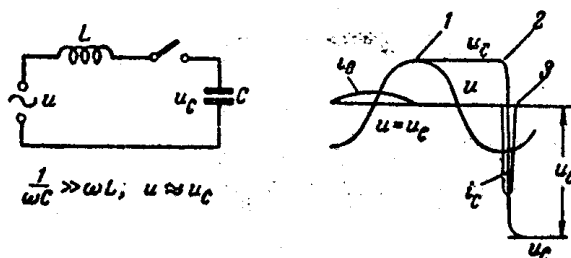


圖 1-3 电容負荷的断开

1—电流切断；2—重新接入；3—振盪电流切断。

在半週期之內，恢復電壓升高到 $2U_{\kappa}$ ，一般就會引起間隙的重複击穿。通過振盪，電容上電壓在半週期內 $T/2 = \pi\sqrt{LC}$ 將達到 $3U_{\phi, \kappa}$ ，而振盪電流達到 $2U_{\kappa}\sqrt{\frac{C}{L}}$ 。在零值附近斷開振盪電流，會使被切電容 C 上剩留下電荷 $3U_{\kappa}C$ 。

變壓器電動勢由 $-U_{\phi}$ 變到 $+U_{\phi}$ ，可能引起新的點燃及在重新充電時電容上電壓進一步提高。實際上過程要進行得更複雜些：重新击穿的 가능성 和击穿的瞬間，基本上，與其說和迴路的性質有關，不如說更和開關的斷開容量有關。近代的速動空氣開關完全沒有可能重複接通，或者在特殊情形下也僅限於一次接通。因此，過電壓或者不發生或者不超過 $2.5U_{\phi}$ 。新結構的油開關一般允許幾次再接通，這時的過電壓將達到約 $3.5U_{\phi}$ 。在美國文獻內常常提到，並且好像在斷開空載線路時觀察到 $5U_{\phi}$ 值，在我們的 110 和 220 千伏裝置上進行的大量測量中並沒有証實這點，可能的極限不超出 $4U_{\phi}$ 。斷開 35 千伏及 35 千伏以下的線路時，從絕緣觀點來看，電壓的升高沒有實際意義。

3. 沒有縱橫阻尼繞組的水輪發電機發生不對稱（兩相）短路，如果被短路的發電機經過變壓器供應空載線路（110、220、400 千伏）時引起的過電壓值應特別注意。大家知道，在這些發電機的沒有短路的相內形成幅值很大的奇數諧波，三次、五次等等，如果短路的瞬間正是轉子軸和被短路繞組的軸相重合，則形成偶數的諧波。在線路電容和發電機與變壓器的平均電感之間有電壓諧振時，如果不考慮電量損耗，過電壓可以達到很大的值，約 $(5\sim 6)U_{\phi}$ 。電量的存在降低了過電壓，但是由於卸掉負荷時電壓升高，這種過電壓對絕緣提出較高的要求。儘管近代開關能較迅速地（在幾分之一秒的範圍內）消除諧振過程，如果空載線路的三次和五次諧波底容抗接近發電機和變壓器的平均感抗 $(\sqrt{X_p'X_q})$ ，則沒有橫阻尼繞組時的過電壓可能對絕緣仍是危險的。

4. 鉄諧振性質的過電壓發生在對地電容的對稱性被破壞的時候，因為電容及電感對工作頻率可能發生諧振。這種過程就會引起所謂變壓器相的反傾，也就是這樣一種電路狀態，變壓器上電壓和作用電壓疊加，造成電容上電壓升高。在極端情形下，當作用電壓是線電壓的時候，被變壓器磁路飽和所限制的最大過電壓值不超出 $(4-4.5)U_{\phi}$ 的範圍，但一般要小很多，特別是在 110 千伏直接接地網絡里更是如此。

按照本身的性質，過電壓可能是持續的。但是，因為適合於過電壓的接線方式一般發生在各種不正常的狀態（導線中斷而接地或者沒有接地，線路所有的導線沒有全都接入），因此繼電保護將很快的消除過電壓。

最高電壓（300—400 千伏）裝置中另一種鉄諧振現象具有很大實際意義。由於經濟上的原因，它們的絕緣不能採用高於 $(3-3.5)U_{\phi}$ 的電壓。如大家所知道的，空載長線路的尾端電壓高於首端。電壓的升高隨着線路長度的平方而增大。