

平绍勋 主编

# 电力系统内部过电压保护

## 及实例分析



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电力系统内部过电压保护 及实例分析

---

平绍勋 主编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是作者以多年实际工作经验编写而成的。它以内部过电压相关的标准、规定为依据,从理论上言简意赅的阐述了内部过电压形成的机理,并采用了大量的事故实例来充分说明发生内部过电压的现象及其危害性,同时针对不同情况所采取的反事故措施,使读者对内部过电压的形成、危害及其特点有了更深刻的认识和了解,并为防范电气设备内部过电压提供了切实可行的解决方案。

本书共分六章,主要内容包括谐振过电压的特性和分类、线形谐振过电压、铁磁谐振过电压、参数谐振-同步电机自励磁过电压、操作过电压的分类和一般特性及中性点接地方式。

本书可供从事电气运行的工程技术人员及设计人员使用,也可供有关专业院校的师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统内部过电压保护及实例分析/平绍勋主编.

北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-4175-9

I. 电... II. 平... III. 电力系统-过电压保护

IV. TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 021152 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

冶林联合印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 7 月第一版 2006 年 7 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 10.5 印张 278 千字

印数 0001 3000 册 定价 21.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

## 前言

内部过电压会在电力系统产生许多危害,轻则损坏设备,造成停电事故,重则危及人身和电网安全。如何正确认识和判断过电压现象,并采取相应的技术防护措施,避免重复性事故的发生,对提高设备和人身的安全、提高供电的可靠性以及保证用电设备连续、安全运行,都具有重大的意义。

本书从理论上阐述了内过电压形成的机理,并用大量的事故实例来说明内过电压的危害性及其采用的反事故措施,使读者对内过电压的特点有更深入的了解,为防范电气设备内部过电压事故提供了实际的解决方案。

本书收集了从低压 380V~500kV 电压等级的各种内过电压的现象和事故实例,内容涉及各类谐振过电压和操作过电压,并对发、供、用电中常见的操作过电压保护,如发电机及转子过电压的保护、真空断路器操作过电压的保护、新型操作过电压保护装置、110kV 和 220kV 变压器中性点过电压保护、500kV 并联电抗器中性点和小电抗器保护、500kV 自耦变压器中性点小电抗接地的过电压保护等,以及近几年来国内外关注的快速瞬态过电压(VFTO)问题作了详细介绍,同时对于中性点接地方式提出一些新观点,如高电阻在电力系统中高、低压的应用,供参考。

本书第一章由高级工程师姜亚南编写,第二章由工程师石健编写,第四章由高级工程师周鑫编写,第六章由高级工程师张圣建编写,第三章、第五章由高级工程师平绍勋编写,全书由平绍

勋主编。由于编者水平有限，错误之处难免，还望读者指正。

本书曾得到江苏如皋市供电公司、如皋市老科协电力分会的大力支持，并由南通供电公司教授级高工徐翔提出了不少宝贵意见，在此一并感谢。

**编者**

2005. 12

## 目 录

## 前 言

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| <b>第一章</b> | <b>谐振过电压的特性和分类 .....</b>     | <b>1</b>  |
|            | 第一节 谐振的特性 .....              | 1         |
|            | 第二节 谐振过电压的分类 .....           | 3         |
|            | 第三节 线性谐振现象 .....             | 4         |
|            | 第四节 参数谐振现象 .....             | 7         |
|            | 第五节 铁磁谐振现象 .....             | 9         |
| <b>第二章</b> | <b>线性谐振过电压 .....</b>         | <b>25</b> |
|            | 第一节 消弧线圈补偿电网中的线性谐振 .....     | 25        |
|            | 第二节 电容传递过电压 .....            | 39        |
|            | 第三节 甩负荷引起的工频电压升高 .....       | 68        |
|            | 第四节 线路的电容效应 .....            | 70        |
|            | 第五节 不对称短路引起的工频过电压 .....      | 74        |
| <b>第三章</b> | <b>铁磁谐振过电压 .....</b>         | <b>78</b> |
|            | 第一节 引言 .....                 | 78        |
|            | 第二节 断线过电压 .....              | 79        |
|            | 第三节 电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压 ..... | 99        |
|            | 第四节 配电变压器一点接地过电压 .....       | 131       |
|            | 第五节 双电源定相过电压 .....           | 134       |

|             |                                      |            |
|-------------|--------------------------------------|------------|
|             | 第六节 串联补偿电网过电压 .....                  | 141        |
|             | 第七节 超高压系统中的谐振过电压 .....               | 144        |
| <b>第四章</b>  | <b>参数谐振——同步电机自励磁过电压 .....</b>        | <b>158</b> |
| <b>第五章</b>  | <b>操作过电压的分类和一般特性 .....</b>           | <b>164</b> |
|             | 第一节 弧光接地过电压 .....                    | 165        |
|             | 第二节 空载线路分闸过电压 .....                  | 175        |
|             | 第三节 空载线路合闸过电压 .....                  | 183        |
|             | 第四节 空载变压器分闸过电压 .....                 | 192        |
|             | 第五节 电动机的分闸过电压 .....                  | 202        |
|             | 第六节 消弧线圈补偿电网中切除接地故障时<br>引起的过电压 ..... | 212        |
|             | 第七节 投切电容器过电压 .....                   | 216        |
|             | 第八节 其他操作过电压 .....                    | 226        |
| <b>第六章</b>  | <b>中性点接地方式 .....</b>                 | <b>276</b> |
|             | 第一节 消弧线圈的原理和结构 .....                 | 276        |
|             | 第二节 自动选线装置的原理和发展 .....               | 282        |
|             | 第三节 中性点电阻接地系统 .....                  | 288        |
|             | 第四节 小电阻接地系统 .....                    | 292        |
|             | 第五节 中电阻接地系统 .....                    | 302        |
|             | 第六节 高电阻接地系统 .....                    | 304        |
|             | 第七节 配电变压器低压侧中性点高电阻接地方式 .....         | 311        |
|             | 第八节 接地变压器原理及容量计算方法 .....             | 314        |
|             | 第九节 中性点电阻器的选择 .....                  | 318        |
|             | 第十节 自耦变压器中性点经小电抗接地 .....             | 321        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>                         | <b>324</b> |

## 第一章

## 谐振过电压的特性和分类

在电力系统中，由于断路器操作、故障或其他原因，使系统参数发生变化，引起系统内部电磁能量的振荡转化或传递所造成的电压升高，称为电力系统内部过电压。

内部过电压分为两大类，即因操作或故障引起的瞬时（以毫秒计）电压升高，称为操作过电压；在瞬间过程完毕后出现的稳态性质的工频电压升高或谐振现象，称为暂时过电压。暂时过电压虽具有稳定性，但只是短时存在或不允许其长期存在。相对于正常运行时间，它是“暂时”的。

## 第一节 谐振的特性

电力系统具有一系列的电气设备（包括断路器、变压器、输电线路、互感器、电抗器、电容器等），在系统进行操作或发生故障时，可组成极为复杂的电感、电容的振荡回路。在正常运行时，振荡现象是不容易发生的，这是因为系统中的有功负荷会对电气振荡回路产生巨大阻尼。在多电源电网内，如图 1-1 (a) 所示，即使传输功率为零，短线路中的各点电位也由电源电势所固定，不可能产生振荡过程，但在某些特定条件下，例如在超高压

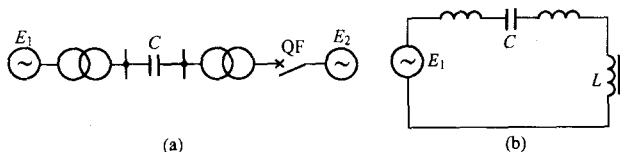


图 1-1 电力系统的谐振回路

(a) 多电源线路图；(b) 断路器  $QF$  断开后的等值电路图

输电线路和中性点不接地电网中，则需采取某些附加措施和补偿设备，以使各点的正常运行电压处在规定的容许范围之内。

当断路器操作或电力系统发生故障时，电网内的某些回路或元件将被分割开来。图 1-1 (b) 为断路器 QF 断开后，形成了主要以串联补偿电容  $C$  (或开关的断口电容器) 和终端变压器 (或电压互感器) 的励磁电感  $L$  所组成的  $L$ 、 $C$  振荡回路。在一定的能源作用下，就有可能产生串联谐振现象，引起谐振过电压。

所谓谐振 (共振)，是指振荡回路中的一种周期性的或准周期性的运行状态，其特征是于某一个或几个谐波幅值的急剧上升。在通常情况下，串联谐振现象会在电网的某一个部分设备 (元件) 造成过电压，以致危及电气设备的绝缘；对于小容量的电感元件 (例如电压互感器)，谐振还会使它产生巨大的过电流，在严重情况下，造成电感线圈及其保护熔丝的过热烧毁。

谐振过电压不仅会在进行操作或发生故障的较短时间的过程中产生，而且可能在过渡过程结束后较长时间内长期稳定存在，直到发生新的操作，谐振条件受到破坏时为止。因此谐振过电压的持续时间要比操作过电压长得多，性质上属于暂时过电压。在某些条件下，谐振现象并不能自保持，它在发生一段短促的时间之后就自动消失。

正是由于谐振过电压的持续性质，其危害性也较大。运行经验表明，在通常的配电网中，几乎所有的内过电压事故都由谐振现象所引起。此外，这种持续性质也在选择保护措施方面造成困难，例如，普通阀型避雷器的通流能力太小，它在谐振过电压下动作后往往遭致毁坏，发生爆炸。

为了尽可能地避免发生谐振过电压，在设计电网和进行操作时，应当事先进行必要的计算和进行反事故措施，改变电网的参数，避免形成不利的谐振回路。在某些情况下，可以考虑采取一些附加措施，例如取消某些元件、调整断路器的同期性、装设阻尼电阻、改变中性点接地方式等，以便消除谐振的发生，或者缩

短谐振过电压的持续时间。

在实际的复杂电网内，故障情况和操作方式是多种多样的，往往难以避免产生严重的谐振现象。对于调度和运行人员来说，应当积累经验，认真仔细地记录。技术管理人员应及时召开事故分析会，详细分析每次谐振过电压事故的前因后果，提出反事故措施。不断地加深对谐振性质和特点的理解，逐步地掌握消除谐振现象的对策和措施，防止同类事故的继续重现。

## 第二节 谐振过电压的分类

在不同电压等级、不同结构的电网中可以产生不同类型的谐振过电压。在电网的振荡回路内，通常认为系统中的电容和电阻元件都可看作线性参数，而电感元件则一般有三种不同特性参数。对应三种不同电感参数，在一定的电容参数和其他条件的配合下，可产生三种不同性质的谐振现象。

众所周知，在频率较低条件下，导线的电感，电机和变压器等的漏感，均基本上维持恒定，即可认为这些参数是线性的。另一方面，由于电机和变压器的励磁电感（铁芯电感）与磁通密度的大小有关。通常，在额定电压或稍高于额定电压时，链过铁芯的磁密选择得接近于饱和状态，因此绕组的励磁电感也是线性的。但是，由于某种原因，当绕组电压大大升高或者发生涌流时，铁芯趋于饱和，电感呈现出非线性，使得振荡回路中出现了非线性电感元件。此外，水轮发电机的直轴同步电感远比交轴电感大，在额定转速下，同步电感将在直轴和交轴电感之间周期性地变化，换言之，振荡回路中出现了周期性变化的电感元件。

对应于上述三种电感参数，在一定的电容参数和其他条件的配合下，会分别产生三种不同性质的谐振现象。

### 1. 线性谐振

电路中电感值不随元件上的电压或电流的变化而变化，电感参数为常数。这类元件主要有不带铁芯的电感元件（如输电线路



的电感、变压器的漏电感)及励磁特性接近线性的带铁芯的电感元件(如带空气隙的消弧线圈铁芯)。在交流电源的作用下,当系统回路的自振频率等于或接近电源频率时,可能产生强烈的线性谐振现象。通常只有在空载或轻载时才会发生谐振,但对零序回路参数配合不当而形成的谐振,系统正序有功功率是不起作用的。

## 2. 铁磁谐振

电路中电感元件因带有铁芯会产生饱和现象,电感参数不再为常数。电感值而是随元件上的电压或电流的变化而变化。这种含有非线性电感元件的电路,在满足一定条件时,会产生铁磁谐振。与线性谐振比较,铁磁谐振现象具有许多特点。在不同条件下,非线性振荡回路可产生三种谐振状态:工频谐振、高频谐振和分频谐振。铁磁谐振现象常发生在由空载变压器、电压互感器(正常工作时接近空载)和电容器组成的回路中。

## 3. 参数谐振

系统中某些元件电感参数在外力的影响下发生周期性变化,其变化频率为电源频率的偶数倍,并有相应的电容配合,回路电阻又不大时,则有可能出现参数谐振。例如电机旋转时,电感参数的大小随时间作周期性的变化。当电机接有电容性负荷(如空载线路),参数配合不当时,就可能产生参数谐振。参数谐振过电压亦被称作旋转电机的自励磁或自激过电压。

研究指出,上述三类别的谐振过电压各有其独特的性质,因此我们将分别加以讨论。

# 第三节 线性谐振现象

在 $L$ 、 $C$ 串联线性电路中,只要电路的自振频率接近交流电源的频率,就会发生串联谐振现象。这时即使是在稳态也可能在电感或电容元件上产生很高的过电压,因此串联谐振也称作电压谐振。



在图 1-2 所示的最简单的串联线性参数回路中, 谐振条件为

$$\omega L = 1/\omega C$$

或写成  $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$  (1-1)

式中  $\omega_0$  为忽略损耗电阻  $R$  时回路的自振角频率。

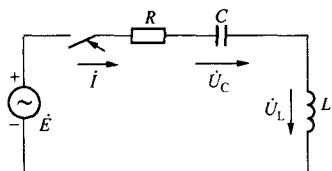


图 1-2 串联线性谐振回路

当  $R \rightarrow 0$  时,  $\dot{I} \rightarrow \infty$  时,  $\dot{U}_L$ 、 $\dot{U}_C$  均趋向于无穷大, 所以,  $R$  是限制谐振过电压的唯一条件。在此谐振条件下, 电流  $\dot{I}$  达到最大值, 其相位角与电源电势  $\dot{E}$  的相位角相同。

在一般情况下, 考虑损耗电阻  $R$  后, 回路的自振角频率变为  $\omega'_0$ , 则

$$\omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \mu^2}$$

式中,  $\mu = R/2L$ 。

通常  $R$  值很小, 因此  $\mu \ll \omega_0$ ,  $\omega_0 \approx \omega'_0$ , 故线性谐振的条件又

可写成

$$\omega_0 \approx \omega'_0 \quad (1-2)$$

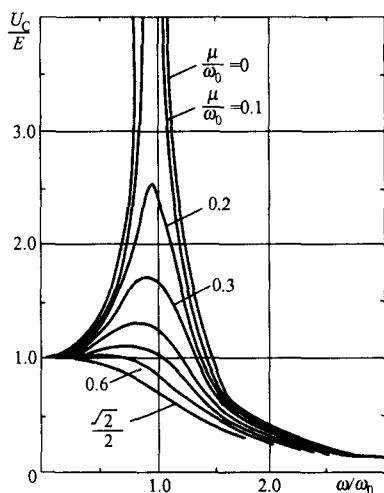


图 1-3 串联回路中电压稳态值  $U_C/E$  与  $\omega/\omega_0$  的关系

图 1-3 画出了不同  $\mu/\omega_0$  时  $U_C/E$  与  $\omega/\omega_0$  的关系曲线。由图可见, 当  $\omega_0$  与  $\omega$  接近或相等时会出现较高的稳态过电压。从图中曲线表明, 在图 1-2 交流电源作用于线性电感  $L$  和电容  $C$ 、电阻  $R$  串联时, 随  $L$ 、 $C$  参数变化, 电压  $U_C$  的变化是连续的, 不一定只有在谐振时才会有危险, 在接近谐振的参数范围内, 都会引起严重的过电压。例如, 在忽略  $R$  的情况下, 超过 3 倍过

电压的危险区域为  $\omega/\omega_0 = 0.81 \sim 1.15$ 。

过电压的最大值  $U_{Cm}$  及其参数条件为

$$U_{Cm} = \frac{E}{\frac{2\mu}{\omega_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\mu}{\omega_0}\right)^2}}$$
$$\omega/\omega_0 = \sqrt{\left(1 - \frac{2\mu^2}{\omega_0^2}\right)}$$

可见，线性谐振过电压仅受损耗电阻的限制：当  $R=0$ ，即  $\mu=0$  时，谐振过电压趋于无穷大； $R$  越大， $U_{Cm}$  越小。

当然，发生严重的过电压时，导线的电晕损耗和相应的等值电导显著增大，铁芯电感也会达到磁饱和状态，以至电感参数自动地偏离谐振区域，所有这些都会降低电网的过电压。

实际上，振荡回路往往十分复杂，自振频率不只一个，显然，只要其中任何一个等于（忽略损耗）或接近于（考虑损耗）电源频率，就将发生线性谐振现象。

综上所述，线性谐振现象具有如下特点：

（1）只要串联回路的电感和电容参数为常数，回路的自振频率就是固定的，当电源频率与之接近或相等时就会发生线性谐振现象。实际电路比较复杂，有时可能具有一个以上的自振频率，甚至电源中也可能包括有谐波，这时只要回路中的一个自振频率与电源频率或它的某一个谐波频率相等或接近，就可能产生这个频率下的线性谐振现象。

（2）当  $\omega=\omega_0$  时，过电压只能由回路电阻来限制，一般回路电阻很小，所以线性谐振过电压幅值可能很高。而在操作或事故造成的谐振过电压的暂态过程中，过电压幅值不会超过稳态幅值。

线性谐振要求有比较严格的参数配合。实际电力系统往往可以在设计或运行时避开谐振范围来避免线性谐振过电压。

在电力系统中，发生不对称接地故障或非全相操作时可能产生线性谐振过电压现象。

## 第四节 参数谐振现象

当同步发电机接有容性负荷（如空载线路）时，由于容性电流的助磁作用，如果参数配合不当，即使励磁电流很小，甚至为零（零起升压），也会使发电机的端电压和电流急剧上升，最终产生很高的过电压，使与其他电机的并联运行成为不可能，这种现象称作电机的自激磁，所产生的自励磁过电压称自激过电压。电机的自励磁现象就其物理本质来说是由于电机旋转时，在正常的同步运行情况下，水轮发电机的同步电抗在  $X_d \sim X_q$  之间电感参数发生周期性变化，即每过一个电周期，电机将变动两个周期。与电容形成参数谐振的基本过程，称为参数谐振过电压。

图 1-4 为最简单的参数振荡回路及其振荡过程。设电感  $L$  在  $L_1 \sim L_2$  内作周期性的突变，变化周期  $T = T_1 + T_2$ ，同时  $L_1 = 2L_2$ ，即

$$\Delta L = L_1 - L_2 = L_2$$

再设电容  $C$  的大小与电感  $L$  的变动周期  $T_1 + T_2$  相适应，即

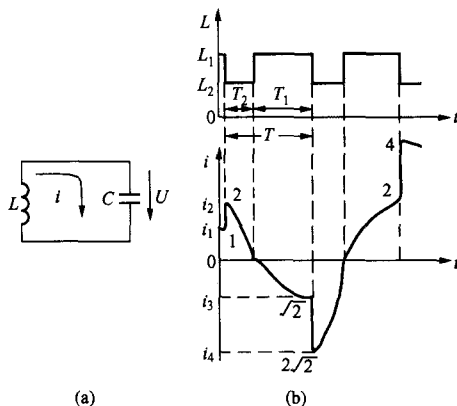


图 1-4 参数谐振的发展过程

(a) 简单回路；(b) 电感与电流变化过程

$$4T_2 = 2\pi\sqrt{L_2C}$$

$$4T_1 = 2\pi\sqrt{L_1C}$$

此外, 在  $t = 0$  的起始点,  $L = L_1, i = i_1 = 1$ , 由于  $L$  突变至  $L_2$ , 根据电感线圈中磁链  $\psi$  不能突变的性质, 电流将突变至  $i_2$ , 即

$$\psi = L_1 i_1 = L_2 i_2$$

$$\text{故得} \quad i_2 = i_1 L_1 / L_2 = 2i_1 = 2$$

线圈中突变前后的储能分别为

$$W_1 = i_1^2 L_1 / 2$$

$$W_2 = i_2^2 L_2 / 2 = i_1^2 L_1 = 2W_1$$

由此可知, 电感从  $L_1$  突变到  $L_2$  时, 线圈中的磁能立即倍增, 显然, 此能量是从改变电感参数的原动机的机械能转化得来的。

由于  $L_2$  时回路的自振周期为  $4T_2$ , 在  $1/4$  个振荡周期  $T_2$ , 回路电流将按正弦规律降至零值, 此时电感由  $L_2$  突变升至  $L_1$ , 但因电感中没有储能, 所以回路中的能量并不因之发生变化。显然, 此时电感中的磁场储能  $2W_1$  已全部转化为电容  $C$  中的电场能, 即  $CU^2/2 = 2W_1$ , 使得电容电压  $U$  随之升高。

由于  $L_1$  时的自振周期为  $4T_1$ , 故再过时间  $T_1$ , 电流由零振荡升至负的半波幅值  $i_3$ , 根据能量守恒定理, 应有  $i_3^2 L_1 / 2 = W_2 = i_1^2 L_1$ , 故  $i_3 = \sqrt{2}i_1 = \sqrt{2}$ 。如在此时电感又突变至  $L_2$ , 相应的电流应为  $i_4 = 2i_3 = 2\sqrt{2}$ 。储能为  $W_3 = L_2 i_4^2 / 2 = 4W_1$ 。通过电磁振荡, 因电感参数的变化, 不断把原动机的机械能转化为电磁能, 回路中的能量愈积愈多, 电感电流  $i$  和电容电压  $U$  也愈来愈大, 这就是参数谐振现象的发展基本过程。当然, 在实际情况下, 等速转动的同步电机的电抗按照正弦规律变化, 而并不是突变的, 但就参数谐振的特点来说, 两者完全一致。根据上述讨论, 可以看出参数谐振过电压的某些特有性质。

第一, 谐振所需的能量由改变电感参数的原动机所供给, 而不需单独的电源电压。对于同步电机来说, 改变参数的能源就是汽轮机或水轮机。同时, 在起始阶段, 只要回路中具有某些残余



能量，即起始扰动，例如，电机转子剩磁割切绕组而产生不大的感应电压或电容两端具有微小的残压，就可保证谐振现象的持续发展。

第二，图 1-4 中的曲线表明，当参数变化的频率与振荡频率之比等于 2 时，谐振最容易发生。

第三，实际电网中存在着一定的损耗电阻，所以每次参数变化所引入的能量应当足够大，即要求电感量的变化幅值  $\Delta L$  ( $L_1 \sim L_2$ ) 应足够大，以便补偿电阻中的能量消耗，使回路中的能量愈积愈多，保证谐振的发展。因此对应一定的回路电阻有一定的自激范围。

第四，谐振发生后，回路中的电流和电压的幅值在理论上能趋于无穷大，这一点与线性谐振现象有着显著区别，后者即使在完全谐振的条件下，其振荡的幅值也受损耗电阻所限制。当然，参数谐振发生后，随着电流的增大，电感线圈达到磁饱和状态，电感  $L$  迅速变小，使回路自动地偏离谐振条件，使自激过电压不能继续增大，从而限制了谐振过电压和过电流的幅值。

从以上分析可见，电感突变引起的参数谐振是一种理想状态，在电力系统中，同步电机的电抗是按正弦规律周期性变化的，不是突变，但就其产生参数谐振而言二者是一致的。

## 第五节 铁磁谐振现象

在电力系统的振荡回路中，往往由于铁芯电感的磁饱和和作用而激发起较高幅值的过电压，即铁磁谐振过电压，它具有与线性谐振过电压完全不同的特点和性能。

由于谐振回路中铁芯电感会因磁饱和程度不同而相应有不同的电感量，所以非线性振荡回路的自振角频率也不是固定的。研究表明，在不同的条件下，非线性振荡回路可产生三种谐振状态：谐振频率等于工频的工频谐振，也称基波谐振；谐振频率等于工频整数倍（2、3、5 倍等）的高频谐振；谐振频率等于工频



分数倍（ $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/5$ 、 $2/3$ 、 $2/5$  等）的分频谐振，也称分次谐波谐振。即使是在基波谐振时，除基波分量外，也还可能有高次谐波。这是铁磁谐振的重要特点。

现以电网中性点不接地，线路长度为  $l$ ，线末接空载变压器（或轻载），发生单相断线为例，对谐振回路的形成和避免发生谐振的条件进行分析。

如图 1-5 (a) 所示，线路终端接有空载或轻载的变压器，每相励磁电感为  $L_K$ ，首端电源侧发生 A 相断线（一端接地）。考

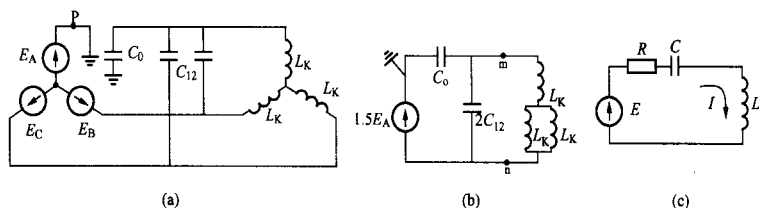


图 1-5 中性点绝缘系统单相断线电路图

(a) 接线图；(b) 等值图；(c) 简化等值图

虑到导线对地电容  $C_0$  和相间电容  $C_{12}$  后，根据等值电源定理将三相电路转化为等值单相电路，将 P 点打开，求出其端电压为  $1.5E_A$ ，然后，将原三相电源短接，并去掉与谐振回路无关的电容（两个对地电容）并可简化为图 1-5 (b) 的单相电路，然后再将 m 点打开，简化为图 1-5 (c) 的最简单的振荡回路，图中  $R$  为等值损耗电阻， $E$  为 m 点打开后的端电压， $C$  为从 m、n 两点向电源侧看去的入口电容，即

$$E = 1.5E_A C_0 / (C_0 + 2C_{12}) = 1.5QE_A$$

$$C = C_0 + 2C_{12} = C_0(1 + 2\delta)/3$$

同时令  $\delta = C_1/C_0$ ，式中  $C_1$  为导线的正序电容，即  $C_1 = C_0 + 3C_{12}$ ， $Q = 3/(1 + 2\delta)$ ， $L = 1.5L_A$ 。表 1-1 中列出了  $\delta$  的数值（一般线路的  $\delta = 1.5 \sim 2$ ）。

