

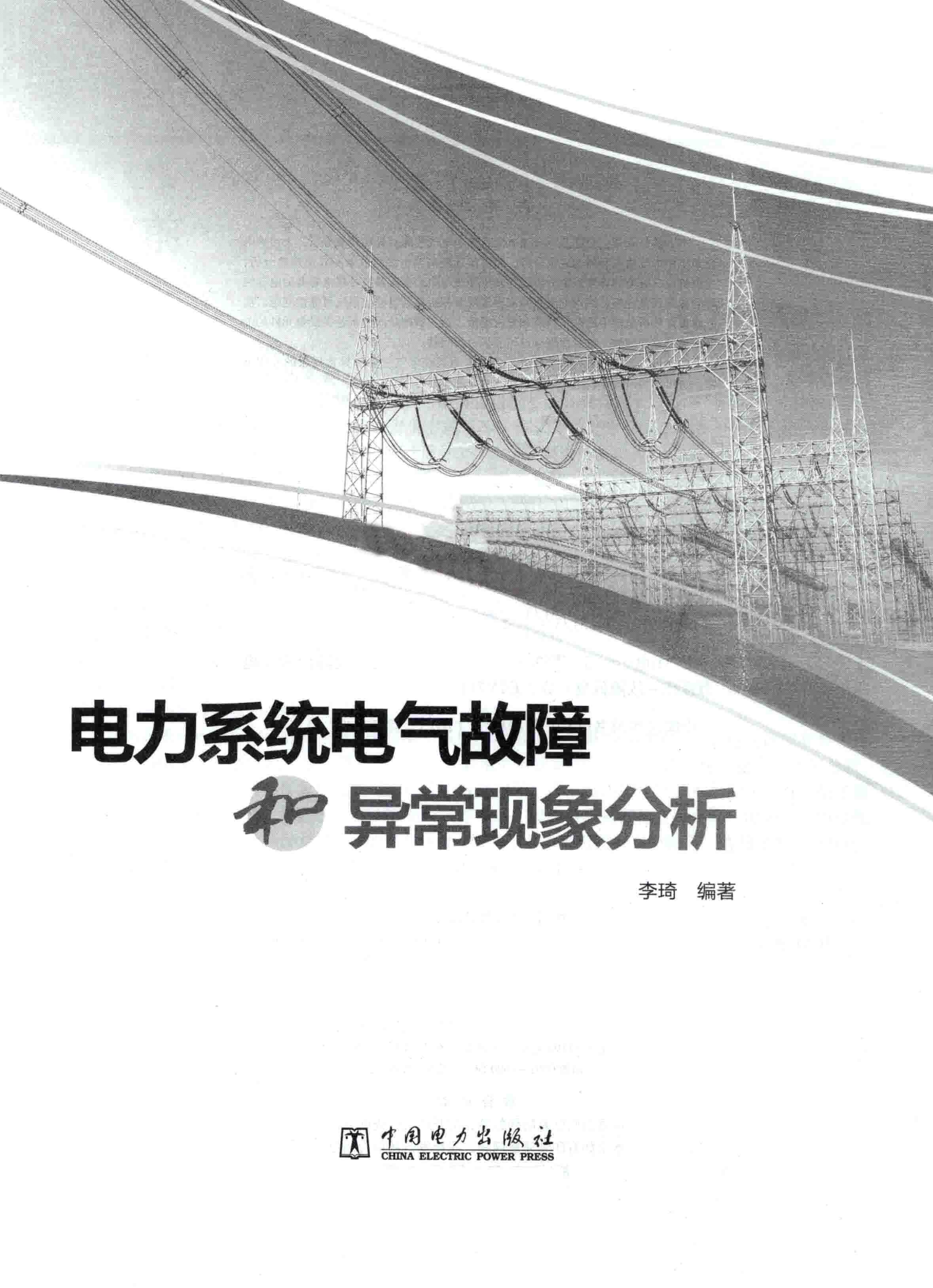


电力系统电气故障 和异常现象分析

李琦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电力系统电气故障 和异常现象分析

李琦 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分六章,分别是小接地电流系统中电气故障和异常现象分析,大接地电流系统中电气故障和异常现象分析,超高压远距离输电线路故障和异常现象分析,发电机电气故障和异常现象分析,异步电动机与电力变压器及并联电容器的电气故障和异常现象分析,站内电气故障和异常现象分析及其自动化系统可靠性问题。前三章重点分析电网中的电气故障和异常现象,后三章则依次分析各类设备元件的电气故障和异常现象,以及保障电站可靠运行的问题。

本书可作为电力科技人员研究、分析电力系统电气故障和异常现象的专用书籍,也可作为高等学校电力系统自动化专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统电气故障和异常现象分析 / 李琦编著. —北京: 中国电力出版社, 2015. 2

ISBN 978 - 7 - 5123 - 5302 - 2

I. ①电… II. ①李… III. ①电力系统 - 故障诊断②电力系统 - 故障修复 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 292427 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷

889 毫米×1194 毫米 16 开本 36.75 印张 1147 千字

印数 0001—1000 册 定价 80.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

电力工业是国民经济的先行工业，涉及各行各业和千家万户，电力系统安全稳定运行是关系国计民生的大事。我国电力系统结构复杂、电压等级多。大型发电厂、变电站遍布各地区电网中，普通电压等级变电站在网内更是星罗棋布，任何一处都有可能发生电气故障和异常现象。而且由于电压等级的不同、系统结构的差异，电气故障和异常现象的表现形式也不一样。为了保障电力系统安全运行，电力科技人员不仅要掌握电力系统正常运行的各种知识，而且要熟悉和了解电气故障和异常现象的知识。

电气故障和异常现象的发生是随机的，时间短暂、过程复杂。其共同之处是都含有电路中储能元件的能量变化（短路故障则发生能量突变），其表现形式是电压、电流的幅值、相位和频率发生变化。电气故障的故障量与系统参数、故障位置和故障发生时间有关；异常现象的电气量与异常现象起因，发生异常现象的网络中储藏的电、磁场能量有关，这就是它们的本质。用数学方法和电气理论来分析、计算电气故障和异常现象很复杂，这是因为实际上系统中各网络的许多元件参数是分布参数，有些还不是常数，电网结构也有所不同，并列运行的发电机电动势幅值、相位也会有差异，发生故障和异常现象具有随机性，故障和异常现象的类型也不一致，如对称故障、不对称故障、接地短路、不接地短路、直接接地短路和经过渡阻抗（电阻）接地短路、一处故障和多处同时发生故障以及发电机失励磁、失步、失去稳定性、振荡、各种过电压、各种谐振等。因此在具体分析时可根据具体电网情况，在实际允许误差的范围内作一些合理假设的基础上进行分析、研究。

本书着重分析了小接地电流电网、大接地电流电网和超高压远距离输电电网中的电气故障和异常现象，对电站的主设备发电机、变压器、电动机、并联电容器组的电气故障和异常现象也作了详细分析，最后分析了站内电气故障与保障自动化电站可靠运行的问题。书中给出不少实验数据和录波图。限于篇幅，三相短路及故障分析、计算的一些基础知识未作介绍，读者可参阅其他有关书籍。电力系统中电气故障和异常现象分析、计算涉及多方面的专业知识，限于本人水平有限，书中贻误、遗漏之处在所难免，殷切希望电力专业同仁和读者阅读后提出宝贵意见和指正。

作 者

2014 年 12 月

物理量、单位及下脚注英汉对照

A (ampere) 安培 (电流的单位)
 AC、ac (alternating current) 交流
 A (Amplifier) 放大器
 add 增加、追加
 arc 电弧
 all 全部、整个
 asy (asynchronizing) 异步
 aut (automatic) 自动、自动控制装置
 av (average value) 平均值
 as · av 异步功率平均值
 B (intensity of magnetization) 磁通密度、磁感应强度
 B (base) 基数、基准
 b (back) 后面、后部
 b (balance) 对称、平衡、均衡
 B (blend model) 混合型
 b (benefit) 效益
 b (bridge) (电) 桥
 bc (broken circuit) 断路
 bp (balance of potential) 均压
 brk (braking) 制动
 C (Capacitance、Capacitor) 电容 (量)、电容器
 C (Characteristic) 特征、特性、特有
 C (Circulation) 环流
 C (Circuit) 电路, 回路
 C (Corretion) 校正值、修正、调整
 C (Complex) 复数、复式、复合
 C (Common) 公共
 C (Constant) 常数
 Cc (Compensation Capacitor) 补偿电容器
 CL (close) 合闸、闭合
 Cp (coupling) 耦合
 Cq (Cyclic quantum) 周期分量
 Cr (critical) 临界
 CV (Cyclic Variation) 周期性变化
 cor (correct) 校正
 comp (compensating) 补偿
 D、d (Delta、delta) 三角形接线 (变压器一次

侧用 D、二次侧用 d)
 D (Differential) 差动
 d (direct axis) 直轴、纵轴
 d (damping、damper) 阻尼、衰减、阻尼器
 d (distribute) 分布
 d (disturb) 干扰
 d (dynamic) 动态 (的)
 d (distance) 宽度、距离
 D (Dissipation factor) 耗散因数
 DC、dc (direct current) 直流
 Dr (Digital rate) 数字比值
 de (dependable) 可靠
 dr (dynamic residual magnetism) 动态剩磁
 displ (displacement) 位移
 E (Earthing) 地、接地
 e (electricity、electric) 电、电的
 eq (equal、equivalent) 等值、等效、相等
 EX (exciting) 激励、励磁、激发
 eff (effective value) 有效值
 EMF (electro-motive force) 电动势
 end 端部
 ent (entrance) 入口
 eoa (extinction of arc) 灭弧
 F (magnetic field) 励磁绕组、磁场、励磁
 F (force) 强制、强迫
 f (front) 前、前部
 f (fault) 故障、障碍
 f (fission) 分裂
 f (frequency) 频率
 F (arrester) 避雷器
 Fe (ferrum) 铁
 FK (Fast relay) 快速继电保护
 G (rotating generator) 旋转发电机
 H (magnetic-field intensity) 磁场强度
 H、h (high) 高、高的、高压
 H、h (Henry) 亨 (电感单位)
 H (hour) 小时
 I (current), i 电流的符号

Im (Imaginary number) 虚数
 In (Input, Incident) 输入、入射
 J (Juice) 电流源、铁芯磁化强度
 j (jump) 转移、跨接
 K (relay) 继电器
 KA (Alternating current relay) 电流继电器
 KV (Voltage relay) 电压继电器
 KM (Contactor) 接触器
 L (Reactors) 电抗器
 L (arcsuppressing coil) 消弧线圈
 L (induction coil) 感应线圈
 L (self inductance) 自感系数
 L (libitum) 自由性、无限制地
 L (Low) 低、低压
 li (line voltage) 线电压
 li (line) 线路
 Lo (Load) 负荷
 M (Monent) 转矩
 M (Machine) 原动机、机组、机械
 M (Motor) 电动机
 M、m (Mutual inductance) 互感系数
 M (middle, middle voltage) 中、中压
 m (member) 元件、(组成) 部分
 m (mean) 平均值
 m (month) 月份
 mo (motion) 动作
 m (metre) 米
 m, min (minute) 分(钟)
 max (maximum) 最大值
 min (minimum) 最小值
 meas (measure) 测量、观察
 N、n (Neutral Point) 中性点
 N、n (Neutral Wire) 中性线
 N (Normal) 额定的、标称的
 n (revolutions perunit time) 每单位时间的转数
 N (Newton) 牛顿(力的单位)
 n (nature) 自然
 Ne (Negative) 负序、阴性的
 ncq (non cyclic quantum) 非周期分量
 ov (over voltage) 过电压
 os (outside) 外部
 osc (oscillate) 振荡
 P (Active Power) 有功功率的符号

p (pole) 极、极对数
 p (pitch) 节距
 P (Parallel model) 并联型
 P (Permit, Permission) 许可、允许
 P (Protector) 保护间隙
 pc (Potential Current) 潜供电流
 ph (Phase) 相
 po (Positive) 正序、阳性的
 pri (Primary) 原有的、起始的、最初的
 Q (Reactive power) 无功功率、无功容量的符号
 Q (Quality factor) 品质因数
 q (quadrature axis) 交轴、横轴
 QF (circuit-breaker) 断路器
 QA (Automatic air-switch) 自动空气开关
 R、r (Resistance) 电阻
 r (rotor) 转子、电枢
 r (residual) 剩余的、残留的
 r (residual magnetism) 剩磁
 r (rate) 比值、比率
 re (restriking voltage) 恢复电压
 Re (Reality number) 实数
 R (reliability) 可靠性
 rp (relative pitch) 相对节距
 RST (Reset) 复位
 ret (return) 返回
 ref (reflected) 反射
 res (resonance) 谐振、共振
 r. p. m (revolutions per minute) 每分钟转数
 S (system) 系统
 s (stator) 定子
 S (Source) 电源、能源
 s (Slip) 转差率
 s (Self) 自己、本身
 s (second) 秒
 S (Series model) 串联型
 S (Complex power) 视在功率、复功率
 sc (short circuit) 短路
 SD (extinction magnetism switch) 灭磁开关
 SA (Control Switch) 控制开关
 sh (shell) 壳体、外壳
 st (steady, standard) 稳态的、标准、判据
 ST (Start, Store) 起动、储备
 su (surge) (电) 冲击、浪(电) 涌

SAT (Saturate) 饱和
 sen (Sensitivity) 灵敏度
 SEQ (Sequence) 序、次序、序列
 set 整定、设置、装置
 stl (steady state limit) 静稳极限
 syn (synchronizing) 同步、比整步
 T (transformer) 变压器
 T (Terminal) 端子、接线柱
 t (time) 时间
 t (temperature) 温度
 t (metric ton) 公吨
 t (transitive) 传递、过渡的
 t (transience) 暂(瞬)态
 t (tooth) 齿
 TA (current transformer) 电流互感器
 TV (Voltage transformer) 电压互感器
 tr (transition) 过渡、瞬变
 ti (trough inside) 槽内
 U 、 u (Voltage) 电压的符号
 ut (utilizable) 可利用的
 unb (unbalance) 不对称
 V (Volt) 伏特(电压单位)
 v (velocity) 速度
 v_{RA} 上升速度
 V (phototube) 光电管、光耦的符号
 VC (Rectifier for control circuit supply) 控制电路
 用电源的整流器
 VCO 上述整流电路用可关断晶闸管

Vib (Vibration) 振荡、振动
 W (bus-bar) 母线、汇流排
 W (Wave、Waveguide) 波、波导
 W (Watt) 瓦(功率单位)、容量符号
 X 、 x (reactance) 电抗
 X_C (Capacitive reactance) 容抗
 X_L (inductive reactance) 感抗
 Y、 y (star connection) 星形接线(变压器一次
 侧用 Y、二次侧用 y)，星形连接
 y (year) 年
 Y (admittance parameters) 导纳参数
 Z (impedance parameters) 阻抗参数
 Φ (magnetic-flux) 磁通
 Ψ (magnetic linkage) 磁链
 μ (magneto conductivity) 磁导率
 ω 角速度
 λ 波长
 ρ 电阻率、不对称度的符号
 γ 电导率、密度符号
 γ 定子 a 相轴线和转子 d 轴夹角
 γ 线路行波传播系数
 β 线路行波衰减系数
 α 线路行波相位系数、角度符号
 ν 脱谐度
 η 表示效益、效应的系数
 θ 温度、温升符号
 θ 、 φ 角度符号
 0 零序、空载

目 录

前言

物理量、单位及下脚注英汉对照

第一章 小接地电流系统中电气故障和异常现象分析	1
第一节 系统中性点不同接地方式的特点	1
第二节 小接地电流系统中的单相接地	10
第三节 消弧线圈的补偿度与容量的选择	23
第四节 小接地电流系统发生单相接地后接地线与正常线的差异	28
第五节 小接地电流系统中的不对称短路	37
第六节 低压配电网故障定位	53
第七节 小接地电流系统中的异常现象	60
第二章 大接地电流系统中电气故障和异常现象分析	83
第一节 电力系统中的简单不对称短路	83
第二节 不对称短路时有关问题的分析	103
第三节 断相故障的分析与计算	128
第四节 复杂故障的分析与计算	147
第三章 超高压远距离输电线路故障和异常现象分析	171
第一节 超高压远距离输电线路的异常现象分析	171
第二节 超高压远距离输电线路短路的暂态过程	203
第四章 发电机电气故障和异常现象分析	241
第一节 概述	241
第二节 发电机失磁故障	245
第三节 定子电气故障	281
第四节 转子电气故障	311
第五节 发电机的异常现象	321
第五章 异步电动机与电力变压器及并联电容器的电气故障和异常现象分析	344
第一节 异步电动机的电气故障和异常现象分析	344
第二节 变压器的电气故障和异常现象分析	390

第三节 并联电容器的电气故障和异常现象分析..... 456

第六章 站内电气故障和异常现象分析及其自动化系统可靠性问题..... 492

第一节 互感器的电气故障和异常现象分析..... 492

第二节 站内低压回路电气故障和异常现象分析..... 524

第三节 电站自动化系统可靠性及其保障措施..... 549

附录 A 经过渡电阻的短路当过渡电阻变化时短路处电流、电压变化的轨迹..... 571

附录 B 电动机的三相电流不对称时负序电流的计算..... 573

附录 C 电磁式电流互感器的误差分析..... 575

第一章

小接地电流系统中电气故障和异常现象分析

第一节 系统中性点不同接地方式的特点

一、电力系统的中性点接地方式

电力系统中主要电气设备（发电机、电力变压器）的中性点接地方式有不接地（中性点绝缘）、经电阻接地、经电抗接地、经消弧线圈接地（共振接地）和直接接地。

目前通用的是以电网综合零序电抗 $X_{0\Sigma}$ 与综合正序电抗 $X_{1\Sigma}$ 的比值作为划分电网接地方式的标准。我国规定中性点直接接地电网“即电网中发电机或变压器的中性点直接或经小阻抗与接地装置连接。电网任意一处的零序电抗与正序电抗的比值 $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} \leq 3$ 。”也有国家以 $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} \leq 4$ 作为划分中性点直接接地电网的标准。

我国规定电压为 220kV 及以上的电网采用中性点直接接地方式。电压为 110 ~ 154kV 的电网一般采用中性点直接接地方式；有时为了减少单相接地短路电流，而将一部分变压器中性点采取不接地（或经放电间隙接地）的运行方式；在雷电活动较强的山岳丘陵地区，构型简单的 110 ~ 154kV 电网，如采用直接接地方式不能满足安全供电的要求和对联网影响不大时，可采用中性点经消弧线圈的接地方式。所以对 110 ~ 154kV 的电网称“中性点直接接地电网”是不够确切的，应该称之为“有效接地电网”。

3 ~ 60kV 的电网应采用中性点非直接接地的方式。当单相接地故障电流大于下列数值时，应装设消弧线圈：3 ~ 10kV 电网，30A；20kV 及以上电网，10A。

与发电机（调相机）电气上直接连接的 3 ~ 20kV 电路，中性点应采用非直接接地的方式。当单相接地故障电流大于 5A 时，如要求发电机（调相机）能带内部单相接地故障运行，应装设消弧线圈。消弧线圈可装在厂用变压器的中性点上，也可装在发电机（调相机）的中性点上。

（一）各种接地方式下的主要运行特征

我国认为：“额定电压为 1kV 及以上的高压系统，单相接地电流或同点两相接地时入地电流大于 500A 的，称为大接地短路电流系统，500A 及以下的，称为小接地短路电流系统。在一般情况下，直接接地的电网属于大接地短路电流系统，非直接接地的电网属于小接地短路电流系统。”本书是采用单相接地电流 $[I_k^{(1)}]$ 和三相短路电流 $[I_k^{(3)}]$ 的比值来划分的： $I_k^{(1)}/I_k^{(3)} = 1.0 \sim 1.5$ 称为特大接地短路电流系统； $I_k^{(1)}/I_k^{(3)} = 0.25 \sim 1.0$ 认为是大接地短路电流系统；而 $I_k^{(1)}/I_k^{(3)} = 0.1 \sim 0.25$ 或更小则称为小接地电流系统。

中性点不接地系统在线路上或系统中发生一点接地时，流过故障点的接地电流主要是电容电流。当线路不太长时，接地电流的数值很小，不至于形成稳定的接地电弧，一般均能自动熄灭。所以中性点不接地系统的主要优点是可以自动清除单相接地故障，而不需跳闸。但是，当线路很长时，电容电流也相当大，接地电弧不能自动熄灭，上述优点也就没有了。3 ~ 60kV 电网就是考虑电弧熄灭而规定单相接地故障电流的数值，对于与发电机（调相机）相连的 3 ~ 20kV 电网，规定单相接地故障电流大于 5A 时则应装设消弧线圈，这是考虑到当发电机内部发生相对地的绝缘击穿，且接地电流大于 5A 时，接地电流将使铁

芯烧损过多，难以修复。

中性点不接地系统的主要缺点是最大长期工作电压与过电压均较高，特别是存在电弧接地过电压的危险，过电压保护装置的费用较大，效果较差，整个系统的绝缘水平因而也较高。虽然中性点不接地系统发生单相接地后，不需立即断开线路（可继续运行 2h 以内），但是要选择可靠、准确的检测装置来检查出接地线路，消除接地故障。

消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感线圈，将其装于变压器或发电机的中性点处，可对单相接地处形成一个与接地电容电流的大小接近相等但方向相反的电感电流，这个电感电流与电容电流相互补偿，使接地处的电流变得很小或接近于零，从而促使接地处的电弧自灭。如图 1-1 (a) 所示为中性点经消弧线圈接地，在 k 处 C 相发生单相接地，中性点 N 对地电压为 $-\dot{U}_C$ ，A 相与 B 相对地电压分别为 $\dot{U}'_A = -\dot{U}_C + \dot{U}_A$ 、 $\dot{U}'_B = -\dot{U}_C + \dot{U}_B$ ，即 A 相和 B 相对地电压升高至线电压值，而 A 相和 B 相的对地电容电流为

$$\dot{I}_A = j\omega C_A \dot{U}'_A; \dot{I}_B = j\omega C_B \dot{U}'_B$$

取 $\dot{I}_A$ 和 $\dot{I}_B$ 分别超前 $\dot{U}'_A$ 和 $\dot{U}'_B$ 90° ，其相量图如图 1-1 (b) 所示。

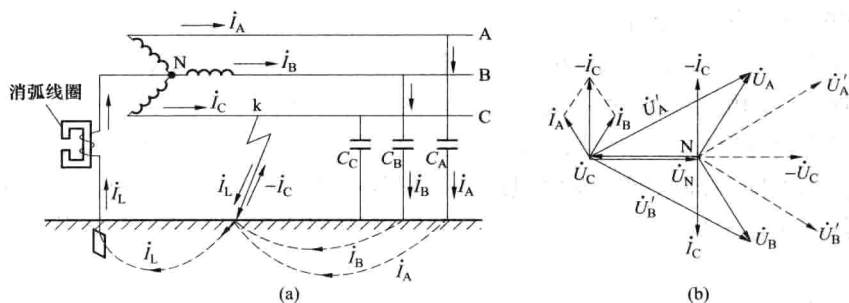


图 1-1 中性点经消弧线圈接地

(a) 接线图；(b) 相量图

从相量图可以看出， $\dot{I}_A$ 和 $\dot{I}_B$ 的合成电容电流 $-\dot{I}_C$ 超前 $\dot{U}_N$ 90° 。由于消弧线圈接于中性点 N，如忽略线圈电阻，则流过消弧圈的电流 $\dot{I}_L$ 将滞后 $\dot{U}_N$ 90° ，其表达式为

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_N}{j\omega L}$$

式中 ωL ——消弧线圈的电抗 X_L 。

故流入接地点的电感电流与电容电流正好相位相反，从而实现了对单相接地电容电流的补偿。调节消弧线圈的感抗，可以使接地处电流很小（甚至接近于零），导致电弧自灭。当接地电流过零时，电弧熄灭以后，消弧线圈的存在还可以显著减小故障相电压的恢复速度，从而减小了电弧重燃的可能性。根据实际统计，装有消弧线圈的电网，其单相接地故障电流约有 60%~80% 的几率可以自行消除。虽然消弧线圈能有效减少单相接地电流，迅速熄灭故障电弧，防止间歇性电弧接地时所产生的过电压，但是当电网中发生单相金属性接地时，中性点经消弧线圈接地的电网和中性点不接地的电网一样，非故障相的对地电压都将增大至原来的 $\sqrt{3}$ 倍。这时尽管可以继续运行，但仍应在较短时间内发现并消除故障，而且中性点经消弧线圈接地的电网查找接地线要比中性点不接地的电网困难些。由于中性点经消弧线圈接地的电网的最大长期工作电压和过电压水平较高，因而这种方式在电压等级较高的电网中采用时，将显著地增大绝缘方面的费用。我国 110~154kV 电压等级的电网一般采用中性点直接接地方式，主要原因是为了降低绝缘水平以减少设备和线路的造价。只有个别雷害事故严重地区为了提高供电可靠性、减少断路器跳闸次数，才采用经消弧线圈接地方式。也有一些国家为了提高运行可靠性，110~154kV 电压等级的电网采用中性点经消弧线圈的接地方式。

中性点直接接地系统发生单相接地故障时，中性点的电位基本上等于地电位（如果接地良好），由于系统零序阻抗不等于正序阻抗，在线路上单相接地时，当 $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma} \leq 3$ ，非故障相对地电压升高倍数 $D \leq 1.3$ ，即小于等于 80% 的线电压值，这意味着可选用灭弧电压等于 80% 最高线电压的避雷器，因而过电压与绝缘水平较低。电网的额定电压越高，这一优点也就越显得重要。中性点直接接地电网在发生单相接地故障时，要流过较大的单相接地短路电流，从而使线路继电保护装置迅速断开故障部分，有效地防止了单相接地时产生的间歇电弧过电压，也带来了中断供电的影响。另外，中性点直接接地系统中发生的单相接地短路电流将在导线周围产生单相磁场，从而对附近的通信线路产生电磁干扰，在一定程度上增加了这些线路防干扰措施的造价。

需要提出的是，在超高压电网中除了对地电容外，还有泄漏损耗和电晕损耗等存在，接地电流中除了无功分量的电容电流外，还有有功分量（有功损耗电流）。即使消弧线圈的电感是按完全补偿的条件来选择的（这时无功分量的电流为零），在接地点仍有残存的有功分量电流流过。电压等级越高，这个残存的有功分量电流也越大，在 220kV 及以上电压的电网中，其值可达 100 ~ 200A，所以采用消弧线圈也达不到熄灭电弧的目的。

（二）各种中性点接地方式的综合比较

1. 供电可靠性与故障范围

单相接地是电力系统中最常见的一种故障，在大接地电流系统中发生单相接地故障时，断路器就会跳闸，造成供电中断，为了弥补这个缺点，在线路上广泛采用自动重合闸，从而增加了断路器的维修工作量。但对永久性接地故障，若重合不成功，供电仍将中断，所以为使重要用户供电可靠性得到保证，最好能有其他供电途径（如双回线、环形电网等）。

目前有的中性点直接接地系统中单相接地短路电流已很大，甚至超过三相短路电流。巨大的接地短路电流在故障电路的元件中通过所造成的后果是相当严重的，可能导致故障范围扩大。例如，当很大的单相接地电流通过电缆时，可能引起电缆外皮和填料的膨胀，从而导致机械变形、电缆绝缘的电气强度降低，严重时甚至使外皮爆裂，危及运行人员安全；又如大接地短路电流通过发电机内部时，即使时间很短，也可能严重烧坏绝缘与铁芯。另外，大电流所产生的电动力对许多电气设备来说也是很危险的。

反之，在小接地电流系统中，一相接地时流经故障点的电流是数值不大的电容电流或残流，因此绝大多数单相接地故障均能迅速自动消除。即使遇到持续性接地故障，也不需立即断开线路，因而运行人员可以有较充裕的时间来处理故障，保证重要用户供电不间断。

2. 过电压和绝缘水平

中性点接地方式对于电网的过电压与绝缘水平有着很大的影响。电气设备和线路的绝缘水平，除与长期最大工作电压有关外，主要决定于各种过电压的大小。

（1）系统的最大长期工作电压。系统最大长期工作电压的数值取决于电力系统的额定电压和中性点接地方式。在电力系统中，为了调压的需要，运行线电压可能比额定电压高出 5% ~ 15%，即 $U_{li} = (1.05 \sim 1.15) U_N$ 。在直接接地电力系统中，最大长期工作电压等于运行相电压，即为 $(1.05 \sim 1.15) U_N / \sqrt{3}$ ；而在小接地电流系统中，由于可带单相接地故障运行，所以最大长期工作电压应按线电压考虑，即 $(1.05 \sim 1.15) U_N$ 。

另外，系统的接地程度越高，健全相上的动态电压升高也越小，因而避雷器的保护特性也越好。这是因为阀型避雷器的续流是指作用在它上面的最大允许工作电压被该电压下避雷器的电阻除后所得的商值。而续流要限制在 80A（最大值）以下，这样火花间隙才能顺利灭弧。金属氧化物避雷器虽然无续流，但是工作特性也与持续运行电压有关。

（2）作用在绝缘上的大气过电压不同。发电厂与变电站中电气设备绝缘上所受到的大气过电压数值，取决于避雷器的保护特性（冲击放电电压和残压）。直接接地系统所用的避雷器的冲击放电电压与残压均较小接地电流系统低（低 20% 左右），也就是直接接地系统的绝缘冲击耐压水平可以相应降低。

（3）作用在绝缘上的内部过电压不同。中性点直接接地系统中内部过电压是在相电压的基础上产生

和发展的；而小接地电流系统中，则可能在线电压的基础上产生和发展，因而数值必然较大。理论分析与实测表明，在中性点不接地或经消弧线圈接地的系统中，各种操作过电压与谐振过电压的倍数几乎都是中性点直接接地系统的 $\sqrt{3}$ 倍左右。在没有特殊限压设备的系统中，各种内部过电压的极限值见表 1-1。

各种内部过电压的极限值			
各种内部过电压的极限值 内部过电压的种类	中性点接地方式		
	不接地	经消弧线圈接地	直接接地
电弧接地过电压	$3.15U_{ph}$	$2.8U_{ph}$	$2.3U_{ph}$
开断空载线路过电压	$4U_{ph}$	$4U_{ph}$	$(1.6 \sim 3.1) U_{ph}$
开断空载变压器过电压	$(4 \sim 4.5) U_{ph}$	$(4 \sim 4.5) U_{ph}$	$3U_{ph} (154 \sim 220kV)$ $3.5U_{ph} (110kV)$
谐振过电压	$(4 \sim 4.5) U_{ph}$	$(4 \sim 4.5) U_{ph}$	$3U_{ph}$

注 表中 U_{ph} 为正常工作时的相电压。

由于中性点直接接地，可使内部过电压降低 20%~30%，因而直接接地系统的绝缘工频耐压水平也可相应地降低。

电力设备的绝缘水平实际上取决于上述三种电压中要求最高的一种。一般情况下是由大气过电压与内部过电压决定的，因为满足了大气过电压和内部过电压的要求，一般也能满足最大长期工作电压的要求。从以上分析可知，直接接地系统的绝缘水平一般可比小接地电流系统低 20% 左右。

降低绝缘水平的经济意义随额定电压的不同而异，在 110kV 以上的高压电网中，变压器等电气设备的造价大约与其绝缘水平成比例地增加，因此采用中性点直接接地时，设备造价大约可降低 20%。但是在 35kV 及以下电压电网中，绝缘费用占总投资的比例较小，采用中性点直接接地方式来降低绝缘水平意义并不大。

3. 继电保护

系统中性点接地方式对继电保护的動作方式（作用于跳闸或信号）及所应用的接线方式（例如两相式或三相式接线）有很大影响。同中性点接地方式关系最密切的是系统的接地保护，大接地电流系统中实现有选择性的接地保护比较容易，而中性点不接地或经消弧线圈接地的电网中，单相接地电流往往比正常负荷电流小得多，则不能采用常规的继电保护方式。目前对小接地电流系统中单相接地后接地线的检测，大致有以下几种方法：

- (1) 利用单相接地时暂态零序电流方向判别接地线。
- (2) 利用接地电流中的高次谐波（常用 5 次谐波）分量，采用 5 次谐波电流最大值与相位双重判据。
- (3) 利用接地前后两相电流变化量之差判别接地线。
- (4) 注入特殊信号电流来检出故障线路。

我国以前曾采用 (2)、(4) 两种方法。从继电保护的观点看，显然以采用中性点直接接地方式最为有利。

4. 对通信和信号系统的干扰

输电线路造成的干扰有两种，一种是低频干扰，另一种是音频干扰。造成干扰的具体途径也有两种，一种是静电感应，另一种是电磁感应。

如果电力系统正常运行时三相完全对称，中性点的位移电压值等于零，则无论中性点接地方式如何，各相电流及对地电压数值相等、相位互差 120°，因而它们在线路周围空间各点所形成的电场和磁场彼此抵消，不会对通信和信号系统产生干扰影响。如三相有些不对称，中性点会有位移，但干扰并不严重，不过这时应注意持续存在的零序分量。

在电力系统中发生单相接地故障时，出现的零序电压与零序电流是强大的干扰源。在小接地电流系

统中，起主要作用的是静电感应；在大接地电流系统中，则以电磁感应为主。静电感应可以用比较简单的方法加以限制，而电磁感应的消除要困难得多。这是指单相接地故障，如果小接地电流系统从一相接地地发展为两相接地故障，则与大接地电流系统情况差不多。

从干扰的角度来看，中性点直接接地的方式最为不利。不过也应看到，在这种方式下接地故障能被迅速切除，而不接地系统一般没有作用于跳闸的接地保护装置，接地故障的延续时间较长，加上电容电流所造成的发弧条件，导致波形严重畸变，使能量中的有功部分转入较高的频率段，因而可能干扰仍较严重。

经消弧线圈接地在这方面具有明显的优越性，因为在这种电网中发生一相接地故障时，感应回路和电流在其中的分布都是受到控制的，而和接地的地点无关，可设法使电磁感应分解为两个彼此抵消的分量。这一点可以用图 1-2 来加以说明，其中图 1-2 (a) 表示一条输电线路 1 和一条通信线路 2 在一段长度 d 内彼此靠近的情况；图 1-2 (b) 为中性点不接地系统单相接地时的接地电容电流分布状况（如果是中性点直接接地系统，则图中阴影三角形将变成矩形），阴影三角形高度取决于故障地点和两端电源的容量大小。无论是中性点不接地系统或中性点直接接地系统，一般情况下，两个相反的纵向感应电压 [用图 1-2 (b) 中的曲线 l 表示] 不可能正好相互抵消，因而通信线上将产生某一合成电压。

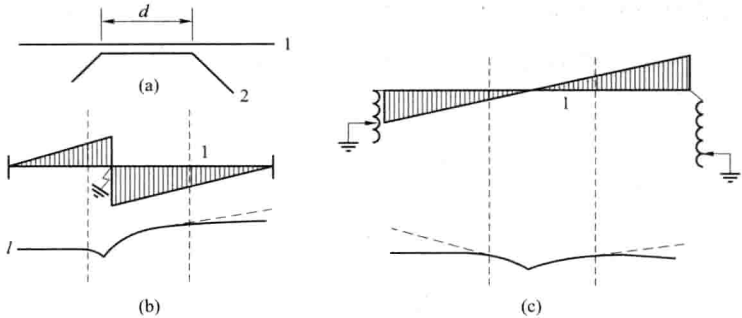


图 1-2 输电线对通信线的影响

(a) 输电线 1、通信线 2 靠近的线段；(b) 中性点不接地系统单相接地时，接地电流的分布和纵向感应电压；
(c) 中性点经消弧线圈接地系统单相接地时，接地电流的分布和纵向感应电压

在中性点经消弧线圈接地的补偿电网中 [见图 1-2(c)]，接地电流的分布和故障地点无关，而取决于消弧线圈的安装地点及其相对位置。这就意味着电流的分布是可以设法调节的，从而使两个纵向感应电压相互抵消。

如果小接地电流系统各相对地电容不对称，则中性点将出现很大的位移电压，即使在正常运行状态下，也存在着一定的零序电压，而且它是长期存在的，这一点应注意。

5. 系统稳定

中性点接地方式对三相短路动态稳定性不起影响，对两相接地短路动态稳定性有一定影响，对单相接地动态稳定性影响较大。中性点直接接地，大的接地短路电流将引起电压急剧降低，可能导致系统动稳定的破坏。

中性点不接地或经消弧线圈接地，则发电机中流过的单相接地电流很小，没有引起失步的可能。

在某些超高压电力系统中，为了使动态稳定性较中性点直接接地时有所提高，而在中性点上接入一数值不大的阻抗，即有效接地系统。例如苏联 500kV 高压线，在水电站变压器中性点接入小电阻接地，实测系统最大摇摆角比采用直接接地方式时小 4° 。当两相接地短路时，如采用直接接地方式，系统稳定在摇摆的第一周内即被破坏，而接入小电阻后保证了动态稳定性。又如美国的一条 230kV、220km 的双回线，在采用直接接地时，两相接地短路时动态稳定性不能保证，后来改成送端变压器中性点经 30Ω 电阻接地，受端变压器中性点经 30Ω 电抗接地，两相接地短路时的动态稳定性即得到保证。

如果送端变压器中性点经小电抗接地，那么只有当短路发生在送端高压母线上时才能对保证动稳定

起一定作用，当短路点离得比较远时几乎不起作用。而送端变压器中性点经小电阻接地的效果好得多，这是因为小电阻不仅和电抗一样能够增大系统的零序阻抗，而且还能吸收一部分有功功率。对受端变电站来说，如果变压器中性点也经小电阻接地，情况就有些不利，因为当受端系统的容量不很大时，线路上发生不对称短路后，这个电阻将消耗掉受端发电厂发出的大量功率，从而对受端发电机起制动作用。

应该说明，利用小阻抗接地作为提高动稳定的措施是有一定条件的。这是因为它仅仅在非全相接地故障时才能起作用，而采取其他措施，例如发电机的电气制动或故障切机却能在任何形式的短路故障时都可发挥作用。另外要指出，在大接地电流情况下，从热稳定条件考虑，采用电阻器昂贵而且笨重，而采用电抗接地可以减小功率损耗，结构也比较简单。所以在接地短路电流不超过三相短路电流 1/4 的情况下，适宜采用小电阻接地，电阻值由典型系统的计算表明，以变压器额定容量为基准约占 4% 左右。如果切除故障线段后的正常电容电流大于 $0.005I_k^{(3)}$ ，那么在接地短路电流不超过三相短路电流 1/4 的系统中，也可采用电抗器接地。这一条件主要是防止电抗器和系统电容在三次谐波所产生的零序电压（约等于 $0.1U_{ph}$ ）下发生谐振，从而引起中性点电压的升高。

二、中性点不接地系统正常运行时的中性点位移

中性点不接地系统正常运行时发生中性点位移，或者说中性点对地的电位发生了偏移，这种现象的产生多数是由于架空线路排列不对称而又换位不完全，致使各相对地电容不相等的原因。

如图 1-3 (a) 所示，一个三相对称电网与负荷相联。由于三相电源电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的，则电源的中性点电位 U_N 为零。

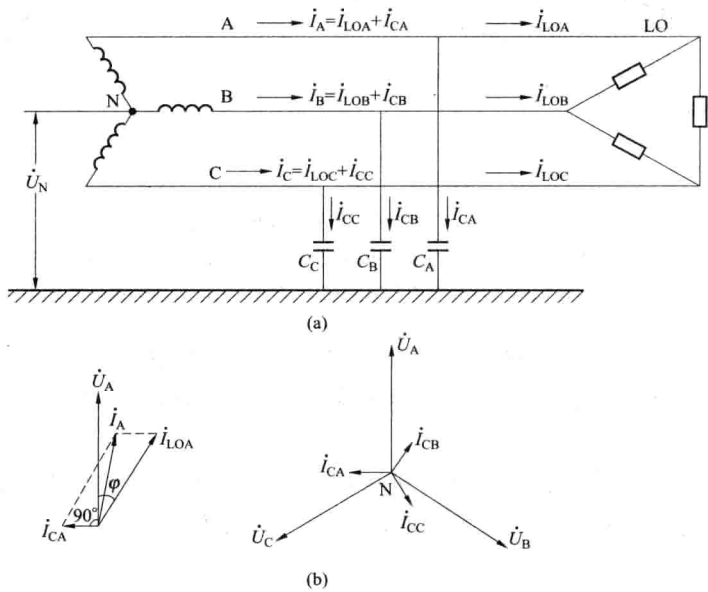


图 1-3 中性点不接地电网的正常工作状态
(a) 接线图；(b) 相量图

各相导线间和相对地之间沿导线全长都有分布电容，在电压作用下流过电容电流。近似分析计算对地分布电容可用集中电容表示，相间电容可以不考虑 [见图 1-3(a)]。当导线经过完全换位后，各相导线的对地电容相等，即 $C_A = C_B = C_C = C$ ，因而在对称三相电压作用下各相所流过的电容电流大小相等，均为 I_C ，而相位则相差 120° ，各相电容电流分别超前所在相相电压 90° [见图 1-3(b)]。各相对地电容电流的相量和为零，即没有电容电流在大地中流通，所以变压器的中性点 N 与等值集中电容器组的中性点之间没有电位差。由于等值集中电容的中性点是地电位，所以变压器的中性点 N 也同样具有地的电位（即 $\dot{U}_N = 0$ ）。因此，对于中性点不接地的三相电网，当三相电压对称、三相对地电容相等时，从正常传输电能的观点来看，中性点接地与否并无任何影响。

可是,当中性点不接地系统的各相对地导纳大小不相等时,即使在正常运行状态,中性点的对地电位 $\dot{U}_N$ 也不再是零,即中性点对地的电位发生了偏移。中性点对地电位位移(简称中性点位移)的程度,对电网绝缘的运行条件来说是很重要的。

下面进一步分析中性点的位移电压 $\dot{U}_{\text{displ}}$ 。正常运行时,输电线路在工频电压作用下,对地导纳 Y 由两部分所组成,其中主要部分为电容电纳 $j\omega C$,次要部分为各相绝缘的对地泄漏电阻所形成的泄漏电导 $1/r$,它比前者小得多。对于中性点不接地的电网,各相对地电流之和应为零,故有

$$(\dot{U}_N + \dot{U}_1)\dot{Y}_1 + (\dot{U}_N + \dot{U}_2)\dot{Y}_2 + (\dot{U}_N + \dot{U}_3)\dot{Y}_3 = 0$$

适当变换后,可得

$$\dot{U}_N = - \frac{\dot{U}_1\dot{Y}_1 + \dot{U}_2\dot{Y}_2 + \dot{U}_3\dot{Y}_3}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3} \quad (1-1)$$

式中 $\dot{Y}_1$ 、 $\dot{Y}_2$ 、 $\dot{Y}_3$ ——各相导线对地的总导纳。

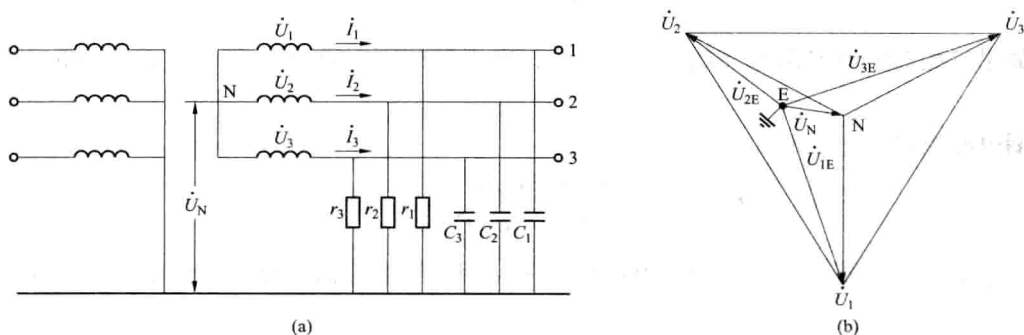


图 1-4 中性点不接地系统正常运行时的等效电路与位移相量图

(a) 系统等效电路图; (b) 三相电压与位移电压相量图

式(1-1)所表达的电压 $\dot{U}_N$ 即中性点的位移电压 $\dot{U}_{\text{displ}}$ 。图 1-4 (b) 画出了中性点位移电压的相量图。图中 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_3$ 为对称的三相电源电压; $\dot{U}_{1E}$ 、 $\dot{U}_{2E}$ 、 $\dot{U}_{3E}$ 分别为各相对地电压, $\dot{U}_N$ (即 $\dot{U}_{\text{displ}}$) 为中性点 N 对地电压(位移电压)。它们之间的关系应该为 $\dot{U}_{1E} = \dot{U}_N + \dot{U}_1$; $\dot{U}_{2E} = \dot{U}_N + \dot{U}_2$; $\dot{U}_{3E} = \dot{U}_N + \dot{U}_3$ 。即相对于各相电容对称的情况而言,中性点由 N 点位移到 E 点。

如果令 C_1 、 C_2 、 C_3 分别代表电网各相的对地电容, r_1 、 r_2 、 r_3 分别代表各相绝缘的对地泄漏电阻,就可得到图 1-4 (a) 所示的等效电路。

取 $\dot{U}_1$ 为基准相量,在三相电源电压对称的情况下,有下列关系

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{\text{ph}}; \dot{U}_2 = a^2 \dot{U}_{\text{ph}}; \dot{U}_3 = a \dot{U}_{\text{ph}}$$

式中 $\dot{U}_{\text{ph}}$ ——基准相电压。

设 $r_1 = r_2 = r_3 = r$, 则式(1-1)可以写成

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= - \dot{U}_{\text{ph}} \frac{j\omega(C_1 + a^2 C_2 + a C_3)}{j\omega(C_1 + C_2 + C_3) + \frac{3}{r}} \\ &= - \dot{U}_{\text{ph}} \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{1}{1 - j \frac{3}{r\omega(C_1 + C_2 + C_3)}} \\ &= - \dot{U}_{\text{ph}} \dot{\rho} \frac{1}{1 - jd} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 $\dot{\rho}$ ——电网的不对称度，由各相对地电容不相等而引起的；

d ——电网的阻尼率，等于电网的电导和电容电纳的比值。

式 (1-2) 中的 $\dot{\rho}$ 为

$$\dot{\rho} = \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (1-3)$$

如仅计算 $\dot{\rho}$ 的绝对值，则有

$$|\dot{\rho}| = \frac{\sqrt{C_1(C_1 - C_2) + C_2(C_2 - C_3) + C_3(C_3 - C_1)}}{C_1 + C_2 + C_3} \quad (1-4)$$

从式 (1-2) 可以看出，中性点的位移电压（不对称电压）就是综合电容电流 $\dot{I}_C = \dot{U}_{ph} \cdot j\omega (C_1 + a^2 C_2 + a C_3)$ 在综合对地阻抗

$$Z = \frac{1}{\frac{3}{r} + j\omega (C_1 + C_2 + C_3)}$$

上的压降。如果三相对地电容相等 ($C_1 = C_2 = C_3$)，则电网的不对称度 $\dot{\rho}$ 等于零，不对称电压 $\dot{U}_N$ 亦等于零。

如将泄漏电导忽略不计，则有

$$\dot{U}_N \approx -\dot{U}_{ph} \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} = -\dot{U}_{ph} \dot{\rho} \quad (1-5)$$

所以，电网的不对称度 $\dot{\rho}$ 近似地代表中性点位移电压与相电压的比值，或不对称电流和综合电容电流的比值。

(一) 电网的不对称度

电网的不对称度通常用百分比或标么值表示。

1. 以百分比表示

$$\begin{aligned} \rho\% &= \left| \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \right| \times 100\% \\ &\approx \frac{|\dot{U}_N|}{|\dot{U}_{ph}|} \times 100\% = \frac{|\dot{I}_{unb}|}{|\dot{I}_C|} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 $\dot{I}_{unb}$ ——电网的不对称电流，是由不对称电压和综合电容电纳造成的。

$\dot{I}_C$ ——电网的综合电容电流。

在中性点不接地系统中， $\dot{I}_{unb}$ 实际上是无法流通的，电网中有接地的中性点时不对称电流才能出现。

以百分比表示的电网不对称度也就是 $|\dot{\rho}| \times 100\%$ 。

2. 以标么值表示

如以最大的一相电容（设为 C_1 ）为基准值，令 m 与 ΔC 各代表相电容的比差值与绝对差值，则有

$$m_2 = \frac{C_2}{C_1}; m_3 = \frac{C_3}{C_1}$$

$$\Delta C_2 = C_2 - C_1; \Delta C_3 = C_3 - C_1$$

可见， m 恒为正值，它小于 1 或等于 1； ΔC 恒为负值或等于零。

按上述关系，电网的不对称度 $\dot{\rho}$ 可以写成

$$\dot{\rho} = \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$