

数据中心高压柴油发电机系统接地研究

文/中国昆仑工程有限公司 李道本

数据中心广泛采用高压柴油发电机作为备用电源。其接地包括系统接地和保护接地部分，系统接地指高压柴油发电机的功能接地，保护接地指高压单相接地故障的电击防护。本文针对数据中心的正常电源采用公用电网供电，其备用电源系统采用高压柴油发电机，研究系统接地的选择及电源切换。

《数据中心设计规范》GB 50174—2017对于数据中心分级规定了应划分为A、B、C三级。A级数据中心的基础设施宜按容错系统配置，在电子信息系统运行期间，基础设施应在一次意外事故后或单系统设备维护或检修时仍能保证电子信息系统正常运行。B级数据中心的基础设施应按冗余要求配置，在电子信息系统运行期间，基础设施在冗余能力范围内，不得因设备故障而导致电子信息系统运行中断。C级数据中心的基础设施应按基本需求配置，在基础设施正常运行情况下，应保证电子信息系统运行不中断。规范还要求A级数据中心应由双重电源供电，并应设置备用电源。备用电源宜采用独立于正常电源的柴油发电机组。当正常电源发生故障时，备用电源应能承担数据中心正常运行所需要的用电负荷。

目前数据中心的正常电源一般由公用电网按重要客户提供两路

电源供电，柴油发电机根据数据中心的分类采用N、N+1配置，从电源配置角度出发实现A级数据中心机房的容错要求。

目前数据中心广泛采用柴油发电机组作为公用电网的备用电源系统。随着数据中心用电设备的增加，因低压配电成套装置母线等因素，使高压柴油发电机组得到广泛应用。发电系统中性点接地是一综合技术问题，它与系统的供电可靠性、人身安全、设备安全、绝缘水平、过电压保护、继电保护和自动装置的配置及动作状态、系统稳定及接地装置等问题有密切关系。对于公用电网的替代电源（备用系统），高压柴油发电机系统应尽可能方便电源的转换，为此就国内公用电网10 kV系统采用的中性点经低电阻接地方式、中性点经消弧线圈接地方式分析和探讨，对高压柴油发电系统的保护本文不作讨论，仅通过标准、规范学习和理解提出对高压柴油发电系统接地的认识，

与大家分享。

高压系统与低压系统中性点接地方式的差异

规定“涉及诸如住宅、工业或商业建筑物的电气装置。它不包括公众电网的配电系统、发电厂及其输电系统”的《电工术语 电气装置》GB2900.71—2008第826—13—11条和“涉及接地与电击防护的科学技术领域”的《电工术语 接地与电击防护》GB2900.73—2008，第826—01—14条规定有：

“[电力]系统接地 (power) system earthing; (power) system grounding (US)

电力系统的一点或多点的功能接地和保护接地。”。

适用于交流标称电压1 kV以上至750 kV以及1 kV以下低压电气装置的接地设计的《交流电气装置的接地设计规范》GB/T 50065—2011在术语中的第2.0.2条和第2.0.3条。规定有：

“[电力]系统接地 (power) system earthing

电力系统的一点或多点的功能接地。”。

“保护接地 protective system earthing

为电气安全,将系统、装置或设备的一点或多点接地。”。

即GB/T 50065—2011与GB2900.71—2008、GB2900.73—2008的规定有差异,区别在于前者将功能接地和保护接地分开表述,适用于高低压系统;后者将功能接地和保护接地合并为系统接地,结合《低压电气装置 第一部分:基本原则、一般特性评估和定义》GB/T 16895.1—2008中“312.2系统接地的型式”的规定,显然突出了低压配电系统的特点。

从《低压电气装置 第4-44部分:安全防护 电压骚扰和电磁骚扰防护》GB/T 16895.10—2010“442因高压系统接地故障和低压系统故障引起的低压装置暂时过电压的防护”,鉴于切断高压系统中的故障通常比切断低压系统中的故障有更长的时间,可能发生变电所高压侧的故障,使变电所运行于较高电压配电系统向低压系统供电,导致接地的低压系统外露可导电部分对地电位普遍升高发生故障和接触电压升高或接地的低压系统对地电位升高引起低压设备的绝缘击穿,而规定了高、低压系统接地相互靠近采取所有的高压接地系统和低压接地系统相互连接或高压接地系统和低压接地系统分隔的措施。从中可以看出高、低压在接地方面要求的不同。

电力系统中性点接地方式 分类及公用电网电力系统 中性点接地方式

电力系统的中性点是电力系统

保证其系统运行、系统安全及经济有效运行的基础。

电力系统的中性点系指电力系统三相交流发电机、变压器接成星形的公共点,而电力系统中性点与大地间的电气连接方式,称之为电力系统中性点接地方式。

电力系统中性点接地方式分为:中性点不接地、中性点经电阻接地、中性点经消弧线圈接地(谐振接地)以及中性点直接接地等。

根据电力系统主要运行特征,将电力系统中性点接地方式特征分为非有效接地系统或小电流接地系统,以及有效接地系统或大电流接地系统两大类。中性点不接地或经消弧线圈接地,中性点经高阻抗接地为非有效接地系统。中性点直接接地或中性点经低电阻接地为有效接地系统。

中性点不接地是指接地是经过集中于三相交流发电机、电力变压器中性点的等值容抗接地的,该容抗是由电网中架空线路、电缆线路、发电机和电动机及变压器绕组等对地耦合电容所组成。正常运行时,三相电源电压是对称的,由于导线间分布电容的存在,各绝缘对地均有泄漏电导,容抗上均有电流;各相对地电流的相量和为零。发生单相接地时,输电线路的导线、电机、电器的导电部分的各相间存在分布电容,各相对地存在着泄漏电导,因此故障相的对地电压为零,非故障相电压升高为线电压。

中性点经消弧线圈接地(谐振接地)是在系统中性点加一特殊电抗器接地的电力系统,在35~63 kV及以下的电网中,接地电容电流超过规定值时,为防止单相接地时,产生稳定或间歇性电弧,必须采取减小接地电流的措施,因而采用中性点加消弧线圈的方案。消弧线圈是一具有铁心的电感线圈,其阻值

小,电抗很大。当发生单相接地故障时,可产生一个电感电流,此值与电容电流值相近,方向相反。因此可对电容电流进行补偿。

中性点经高阻抗接地是电力系统中性点经过电阻器接地,其电阻阻值为数百至数千欧姆,高阻抗地可限制系统单相接地时的故障电流。当采用高阻抗地时高阻抗地系统可消除大部分谐振过电压,对单相间歇弧光接地过电压具有一定的限制作用。当单相接地故障电流小于10 A时,系统可在接地故障条件下持续运行,该接地型式主要用于发电机回路。发电机中性点经高阻抗地后,发电机单相接地故障时,限制非故障相过电压不超过2.6倍额定电压,限制接地故障电流不超过10~15 A,且为定子接地保护提供电源。

因城市建设的需要,城市电网和工业企业配电网中,电缆线路所占的比例日益增加,而它的电容电流是同样长度架空线路的25~50倍,某些电网出现消弧线圈容量不足的情况,使中性点经低阻接地在这些电网中得到应用,目前北京等地公用电网中已在应用。10 kV电缆线路构成的送配电线路采用的中性点经低电阻接地方式,其电阻阻值一般在10~20 Ω ,单相接地故障电流为100~1 000 A。

国家电网标准《配电网规划设计技术导则》Q/GDW 738—2012中第8.8.2条规定了“中性点接地方式一般可分为直接接地方式和非直接接地方式两大类,非直接接地方式又分不接地、消弧线圈接地和阻性接地。

a) 110 kV系统采用直接接地方式。

b) 66 kV系统可采用经消弧线圈接地。

c) 35 kV、10 kV系统可采用不

接地、消弧线圈接地或低电阻接地方式。”。

第8.8.3条规定了35 kV架空网宜采用中性点经消弧线圈接地方式；35 kV电缆网宜采用中性点经低电阻接地方式，宜将接地电流控制在1 000 A以下。

第8.8.4条规定了10 kV配电网中性点接地方式的选择应遵循的原则：①单相接地故障电容电流在10 A以下，宜采用中性点不接地方式。②单相接地故障电容电流在10~150 A，宜采用中性点经消弧线圈接地方式。③单相接地故障电容电流达到150 A以上，宜采用中性点经低电阻接地方式，并应将接地电流控制在150~1 000 A范围内。

上述规定表明公用电网10 kV供电系统国内有不接地、经消弧线圈接地以及经低电阻接地方式。

设计手册中规定了当电压为10 kV时，钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统，单相接地故障电容电流不超过10 A；当电压为10 kV时，非钢筋混凝土或非金属杆塔的架空线路构成的系统，单相接地故障电容电流不超过20 A；当电压为10 kV电缆线路构成的系统，单相接地故障电容电流不超过30 A时，宜采用不接地方式，或经消弧线圈接地方式。超过上述规定值应采用经消弧线圈接地方式。

对以架空线路为主的10 kV系统及10 kV的电子系统以及发电厂厂用电系统，单相接地电流较小时，为防止谐振、间歇性电弧接地过电压对设备的损害，可采用经高阻接地方式。

不同电力系统中性点接地方式对继电保护要求

国家标准《继电保护和安

全自装置技术规程》GB/T 14285—2006中对3~10 kV中性点非有效接地电网有如下规定：

“4.4.3.1 在发电厂和变电所母线上，应装设单相接地监视装置。监视装置反应零序电压，动作于信号。

4.4.3.2 有条件安装零序电流互感器的线路，如电缆线路或经电缆引出的架空线路，当单相接地电流能满足保护的选择性和灵敏性要求时，应装设动作于信号的单相接地保护。如不能安装零序电流互感器，而单相接地保护能够躲过电流回路中的不平衡电流的影响，例如单相接地电流较大，或保护反应接地电流的暂态值等，也可将保护装置接于三相电流互感器构成的零序回路中。”。

国家标准GB/T 50062—2008中第5.0.4条规定“3~10 kV经低电阻接地单侧电源线路，除应配置相间故障保护外，还应配置零序电流保护。零序保护应设二段，第一段应为零序电流速断保护，时限应与相间速断保护相同；第二段应为零序过电流保护，时限应与相间过电流保护相同。”，GB/T 14285—2006第4.4.6节也有相同的规定。

对于经消弧线圈接地方式的10 kV单侧线路保护在GB/T 50062—2008和GB/T 14285—2006仅规定了可装设过电流保护。

Q/GDW 738—2012中第8.9.4条规定了“10 kV配电网应采用过电流、速断保护，架空及架空电缆混合线路应配置重合闸；低电阻接地系统的线路应增设零序电流保护；合环运行或有电源并网的配电线路应增设相应保护装置，确保能够快速切除故障。”

显然上述规定表明10 kV中性点非有效接地系统的中性点不接地、谐振接地（经消弧线圈接地）、高阻抗接地方式与有效接地系统的低

电阻接地系统继电保护要求有差异，即设置零序电流保护的规定不同。

高压柴油发电机系统中性点接地方式及性能的比较

高压柴油发电机系统的接地方式有中性点不接地、中性点经电阻接地（按电阻值分为低电阻接地和高电阻接地）、中性点经消弧线圈接地（谐振接地）。

1. 非有效接地系统与有效接地系统优缺点的比较

（1）非有效接地系统

优点：

1) 供电可靠性高。由于系统单相接地时，没有形成电源的短路回路，而是经过三相线路的对地电容形成的电流回路，回路中通过的电容电流较小，达不到继电保护装置的動作电流值，故障线路不跳闸，只发出接地报警信号。有关电力规程规定系统可带单相接地故障点运行2 h，在2 h内排除了故障就可以不停电，从而提高了供电可靠性。

2) 单相接地时，不易造成或轻微造成人身和设备安全事故。

缺点：

1) 因系统单相接地故障时，非故障相对地电压升高到正常时的 $\sqrt{3}$ 倍，因此系统的绝缘水平应按线电压设计，由于电压等级较高的系统中绝缘费用在设备总价格中占有较大的比重，所以此种接地方式对电压较高的系统不适用。

2) 单相接地时，易出现间歇性电弧引起的谐振过电压，幅值可达电源相电压的2.5~3倍，足以危及整个网络的绝缘。

（2）有效接地系统或大电流接地系统

优点：

系统过电压水平和输变电设备所需的绝缘水平较低。系统的动态电压升高不超过系统额定电压的80%，在高电压电网中采用此种接地方式可降低设备及线路造价，有显著的经济效益。

缺点：

单相接地故障时，单相接地电流很大，致使断路器跳闸，影响供电可靠性，由于单相短路电流有可能超过三相短路电流，影响对断路器的分断能力的选择；且对通信线路产生干扰。

2. 中性点接地方式的适用范围

1) 单相故障接地电流不大于规定值时，宜采用不接地方式，或经消弧线圈接地方式。

2) 10 kV的电子系统，单相接地故障电流较小时，为防止谐振、间歇性电弧接地过电压对设备的损害，可采用经高阻接地方式。

3) 非有效接地系统根据保护选择性需要设定单相接地电流跳闸值可采用经高阻接地方式。

数据中心高压柴油发电机系统中性点接地方式的选择

1. 宜与正常电源系统接地一致

数据中心10 kV配电站一般按公网作为正常电源来设计，接入的10 kV电源其系统接地是由上级公用电网的110~35 kV区域变电站确定的，即公网10 kV系统接地为中性点经消弧线圈接地方式或中性点经低电阻接地方式。

数据中心10 kV配电站的设计必须依据电力系统的系统接地来设计高压配电装置系统的一次及二次线路。根据现行国家标准设计规范的要求采用中性点经消弧线圈接地方式，其馈出线路装设过电流保护即可；当采用中性点经低电阻接地系统时，除馈出线路装设过电流

保护，其进线和馈出回路还需设置零序电流保护。鉴于系统接地的不同，其设计要求也不同，高压柴油发电系统作为正常电源的公用电网的备用系统，数据中心10 kV配电站系统设计应综合考虑正常电源的公用电网与备用电源的高压柴油发电系统在继电保护方面的共用问题。

正常电源失电，改由高压柴油发电设备来供电后，高压柴油发电系统的中性点接地方式就是供电的系统接地。

若高压柴油发电系统的中性点接地方式与公用电网的系统接地做法一致，则继电保护系统不需要改变，方便了正常电源与备用电源系统的转换。例如同为中性点经低电阻接地方式；或正常电源为经消弧线圈接地方式与备用电源系统同为非有效接地系统时。

2. 宜依据系统的单相接地故障电容电流确定其电源中性点接地方式

电网中的单相接地电容电流由电力线路和电力设备（同步发电机、大容量同步电动机及变压器等）两部分的电容电流组成，但是电力设备的电容电流比线路的电容电流小得多，故一般工程设计中忽略不计。

中国电力出版社《工业与民用配电设计手册 第三版》提供了电缆线路的单相接地电容电流的估算公式 $I_c = 0.1 U_l I$ A（式中 U_l 是线路额定线电压，kV； l 是线路长度，km； I_c 是接地电容电流）；架空线路的单相接地电容电流的估算公式 $I_c = U_l I / 350$ A；10 kV变电站增加的接地电容电流值16%，可以估算出单相接地电容电流。可以查得10 kV电缆线路的以下截面每千米接地电容电流的平均值，例如：70 mm²是0.09 A/km，95 mm²是1.0 A/km，120 mm²是1.1 A/km，150 mm²是1.3 A/km，185 mm²是1.4 A/km。

以北京电网城区为例，110 kV变电站110 kV/10 kV主变压器一般单台容量50 MV·A，其系统接地为中性点低电阻接地方式，采用电缆向用户供电。但数据中心用户的10 kV电气设备及电缆数量有限，其单相接地故障电容电流一般超过30 A或大于100 A的可能性不大，若依照单相接地故障电容电流来选择柴油发电系统的接地方式，则宜选择中性点不接地系统或经消弧线圈接地方式。

北京城区电网供电的数据中心其10 kV配电站按照系统接地为中性点经低电阻接地系统来设计，柴发系统的系统接地也采用中性点经低电阻接地方式，对继电保护部分不作修改，其供电可靠性不变，技术经济合理。

3. 公网的系统接地是中性点经消弧线圈接地方式，高压柴油发电机系统中性点采用经高电阻接地方式需通过技术经济比较来确定

若公网的系统接地是中性点经消弧线圈接地方式，数据中心的高压柴油发电系统替代公网供电，其单相接地电容电流不超过30 A或100 A时，宜选择中性点不接地系统或采用中性点经消弧线圈接地方式。

高压柴油发电系统的中性点不接地及经消弧线圈接地方式与采用中性点经高电阻接地方式同为非有效接地系统，供电可靠性可以得到保证，但中性点接地方式采用经高电阻接地较中性点不接地系统在初期投资和以后的运维中成本要大。中性点不接地或经消弧线圈接地在实现继电保护选择性方面较困难，公网系统接地为经消弧线圈接地方式时，选择高压柴油发电机系统中性点经高电阻接地方式需通过技术经济比较来确定。

（下转第40页）

路市电供应这个说法，但是对于什么是双路市电的定义，并没有最广泛的统一的定义。

两路市电，可以从两个角度理解，一个是物理角度，一个是链路角度。如果从物理角度来看，是两个不同物理路由的概念。如果从链路角度，从同一个上级电力站供应，只要是来自于不同母线段，那就是双路市电。

从可用性角度来看，其实是国家电网和数据中心可用性之间的SLA。

目前绝大多数数据中心的双路市电，是来自于同一个上一电压等级的供电站。但也有部分数据中心的确是来自两个不同物理位置的上一电压等级的用户站。目前市场上见到的最“苛刻”的双路市电的确是来自于两个不同的220 kV的供电站。（备注：这样的数据中心双路市电案例是非常特殊的用户，不太

具有广泛意义。）

关于数据中心大用户直供电

虽然到目前为止，尚无数据中心大用户直供电的案例，造成这种现象的主要原因：一是以往的数据中心的容量和耗电量相对其他行业偏小；二是数据中心用户对于国家的相关政策关注度不够；但国家关于大用户直供电的政策由来已久。读者可关注以下政策：

(1) 《关于完善电力用户与发电企业直接交易试点工作有关问题的通知》（电监市场〔2009〕20号）。

(2) 关于印发《电力用户与发电企业直接交易试点基本规则（试行）》的通知（电监市场〔2009〕50号）。

(3) 《国家能源局综合司、工业和信息化部办公厅关于规范

电力用户与发电企业直接交易的通知》（国能综监管〔2013〕506号）。

(4) 各个省市的相关直供电政策。

归纳和总结

站在数据中心投资者和运营者的立场上，需要深入透彻地理解国家电网（或南方电网）和数据中心的关系，包括但不限于电压等级、回路数量、容量、可用性和电费等。这些因素不仅贯穿数据中心整个生命周期，更决定了数据中心的成本模型和投资回报，结合数据中心所在地的电网实际情况，合理使用各种策略至关重要。EA

——摘自数据中心工作组出版的《数据中心能源白皮书系列——数据中心能源构架篇》

（上接第34页）

4. 公网系统接地是中性点经消弧线圈接地方式，高压柴油发电机系统接地不推荐采用中性点经低电阻接地方式

中性点采用经消弧线圈接地方式可带单相接地故障点运行2 h，在2 h内排除了故障就可以不停电，而经低电阻接地方式在发生单相接地故障时，因单相接地电流很大，致使断路器跳闸，影响供电可靠性，显然经消弧线圈接地较经低电阻接地方式系统供电可靠性高。虽然10 kV配电装置中已普遍采用综合保护器（数字式保护继电器），实现零序电流、零序电压的监视，控制很容易，但没有必要采用影响供电可靠性的方案，所以公网系统接地为

中性点经消弧线圈接地方式，高压柴油发电机系统的系统接地不推荐采用经低电阻接地方式。

结束语

本文在前言中设定了讨论A级数据中心中高压柴油发电机系统作为公用电网替代电源（备用系统）及不讨论高压柴油发电系统的继电保护部分，依据国家现行标准探讨高压柴油发电系统的功能接地方式，通过以上讨论提出下列建议供同行参考：

1) 高压柴油发电机系统供电时的系统接地方式应根据单相接地故障电容电流值来确定。

2) 高压柴油发电机系统供电时其系统接地方式宜与公用电力网的系统接地方式一致，即公用电力网系统接地为中性点经消弧线圈接地方式时，高压柴油发电机系统的功能接地方式应采用中性点经消弧线圈接地方式或不接地方式；公用电力网系统接地为中性点经低电阻接地方式时，高压柴油发电机系统的功能接地方式应采用中性点经低电阻接地方式。

3) 公用电力网系统接地为经消弧线圈接地方式时，高压柴油发电机系统的功能接地方式通过技术经济比较合理时，可采用中性点经高阻抗接地方式。EA