

中性点接地方式的选择及计算实例分析

张莹

(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

[摘要] 电力系统的中性点的运行方式,是一个十分复杂的问题。它与电压等级、单相接地短路电流、过电压水平、保护配置等有关,直接影响到绝缘水平、系统供电的可靠性和连续性、通信干扰等很多方面。本文结合某国外项目的实际设计范例,介绍了中性点接地方式的选择的过程和相关接地元件的参数计算。

[关键词] 中性点接地;接地方式;有效接地;非有效接地

[中图分类号] TM862 [文献标志码] B [文章编号] 1003-8884(2021)06-0042-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.06.009

0 引言

电力系统的中性点的运行方式,是一个十分复杂的问题。它与电压等级、单相接地短路电流、过电压水平、保护配置等有关,直接影响到绝缘水平、系统供电的可靠性和连续性、通信干扰等很多方面。作者以往所接触的工程为国内的用电企业配电网或小型火力发电厂的设计,其中性点接地方式多借鉴成熟设计经验。本文结合某国外项目的实际设计范例,介绍中性点接地方式的选择的过程和相关接地元件的参数计算。

1 系统接地方式的介绍

中性点的接地有中性点有效接地系统和中性点非有效接地系统两大类(也称中性点直接接地和中性点非直接接地)。也有根据单相接地电流或同点两相接地时入地电流的大小来区分中性点接地系统,把大于500 A的称为大接地短路电流系统,500 A及以下的称为小接地短路电流系统。一般情况下,中性点直接接地系统属于大接地短路电流系统,非直接接地电网属于小接地短路电流系统。

具体接地形式又分为中性点直接接地、中性点

经消弧线圈(消弧电抗器)接地、中性点经电阻器接地、中性点不接地四种。其中,中性点经电阻器接地,按接地电流大小又分为高阻接低和低阻接地。

1.1 中性点直接接地

中性点直接接地或经一低值阻抗接地的系统,称为有效接地系统。采用中性点经低值(不大于10 Ω)电阻接地,也是有效接地系统。

有效接地系统的优点是系统的过电压水平和绝缘水平较低。系统的动态电压升高不超过系统额定电压的80%,高压电网中采用这种接地方式降低设备和线路造价,经济效益显著。

缺点是发生单相接地故障时单相接地电流很大,为了防止损坏设备,必须迅速切除接地相甚至三相,降低了供电连续性,因而供电可靠性差。此外单线接地电流有时会超过三相短路电流,影响断路器遮断能力的选择,并有对通信线路产生干扰的危险。

1.2 中性点不接地

中性点不接地方式优点是发生单相接地故障时,不形成短路回路,通过接地点的电流仅为电容电流。当单相接地故障电流很小时,无需使线路断开,可以带故障运行一段时间,以便查找故障线路,因而大大提高了供电可靠性。另外电网的单相接地电流很小,对邻近通信线路干扰也小。

缺点是发生单相接地故障时,非接地相的对地电压却升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,而且会产生弧光重燃过电压。这种过电压现象会造成电气设备的绝缘损坏或开关柜绝缘子闪络,电缆绝缘击穿,所以要求系统绝缘水平较高。

[收稿日期] 2021-09-08

[作者简介] 张莹(1978-),女,天津市人,高级工程师,硕士,主要从事电气设计工作。

[引用格式] 张莹.中性点接地方式的选择及计算实例分析[J].有色设备,2021,35(6):42-46.

1.3 中性点经消弧线圈接地

3~63 kV 电网当单相接地电流超过允许值时,可采用消弧线圈补偿电容电流保证接地电弧瞬间熄灭,消除弧光间歇接地过电压。

1.4 中性点经电阻接地

(1) 中性点经高电阻接地。高电阻接地方式以限制单相接地故障电流为目的,电阻阻值一般在数百~数千欧姆。采用高电阻接地的系统可以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,同时可提供足够的电流和零序电压,使接地保护可靠动作,单相接地故障电流小于 10 A,系统可在接地故障条件下持续运行不中断供电。缺点是系统绝缘水平要求较高。一般用于大型发电机中性点。

(2) 中性点经低电阻接地。6~35 kV 主要有电缆线路构成的送、配电网,单相接地故障电容电流较大时,可采用低电阻接地方式,单相接地故障电流 100~1 000 A。低电阻接地的优点是快速切除故障,过电压水平低(参考中性点直接接地系统),可采用绝缘水平较低的电缆和设备。但应考虑供电可靠性要求、故障时瞬态电压、瞬态电流对电气设备的影响,对通信的影响和继电保护技术要求。

该接地方式适用于电缆线路,不容易发生瞬时性单相接地故障且系统电容电流比较大的城市配电网、发电厂厂用电系统及工矿企业配电系统。

总而言之,在电压等级较高的系统中,绝缘费用在设备总价格中占相当大比重,降低绝缘水平带来的经济效益很显著。所以一般采用中性点直接接地方式,而以其他措施提高供电可靠性。反之,在电压等级较低的系统中,一般采用中性点不接地方式以提高供电可靠性。在我国,110 kV 及以上的系统中性点直接接地,66 kV 及以下的系统中性点不接地。在国外,由于通常都采用有备用接线方式,供电可靠性有保障,66 kV 及以下的系统中性点往往也直接接地。

2 中性点接地方式的选择

2.1 示例工程概况

某国外项目建设地点位于西非某国西部冶炼厂区内,为向冶炼厂配套提供硫酸的制酸厂,副产蒸汽发电。硫酸生产规模为 1 500 t/d,制酸产生的热量余热回收生产蒸汽,除酸厂自用外多余蒸汽采用汽

轮机发电。主要的工段有熔硫及储存、焚硫转化及余热回收、干燥吸收、尾气吸收、发电站、除盐水处理站、启动锅炉房、配电室及综合楼。电力设计范围包括厂区内部分配、余热发电站、工艺设备控制、生产照明、设备防雷、接地。

开车时,本项目电源由冶炼厂提供。本项目内设 33 kV 配电站,利用 33 kV 并网线路将冶炼厂电能经主变降压,送电至 6.6 kV 厂用母线,作为项目启动电源,主变压器在启动时作为降压变压器。

正常生产后,利用制酸过程中产生的热量进行余热发电。余热发电首先供给厂内用电负荷,剩余的电量经升压送至冶炼厂的 33 kV 电网,此时主变作为升压变压器。发电机出口接入 6.6 kV 厂用母线。全厂主接线系统如图 1 所示。

本项目用电负荷情况如下:

(1) 中压 6.6 kV 负荷:用电设备台数 1 台、用电设备容量 3 100 kW。计算有功功率:2 480 kW、计算视在功率 2 755.6 kVA。

(2) 低压 525 V 负荷:用电设备安装台数 205 台、工作台数 190 台。用电设备安装容量 5 235 kW、工作容量 4 191 kW

厂内设一台 33/6.6 kV 16 MVA 有载调压变压器,33 kV 侧经电缆由钽冶炼厂引来,6.6 kV 侧经电缆引至厂用母线,6.6 kV 采用单母线接线;

厂内设两台 SCB11 6.6/0.525 kV 2500 kVA 变压器,6.6 kV 侧经电缆由厂用母线供电;0.525 kV 侧采用单母线分段接线,放射式供电,为厂内低压负荷供电;

厂内设一台三相同步汽轮发电机,额定电压为 6.9 kV,额定频率 50 Hz(3 000 r/min),额定功率为 15 MW。发电机出口经母线引至 6.6 kV 厂用母线。

2.2 系统接地方式的选择

本工程业主有文件要求:

33 kV 电源端中性点通过阻抗接地,故障电流限制在 300 A 以下;

6.6 kV 电源端中性点通过阻抗接地,故障电流限制在 150 A 以下;

525 V 采用 TN-S 系统,电源端中性点直接接地。

525 V 接地方式与我国的习惯方式一致,不再论述。本文着重对 33 kV 和 6.6 kV 系统的中性点接地方式进行分析。

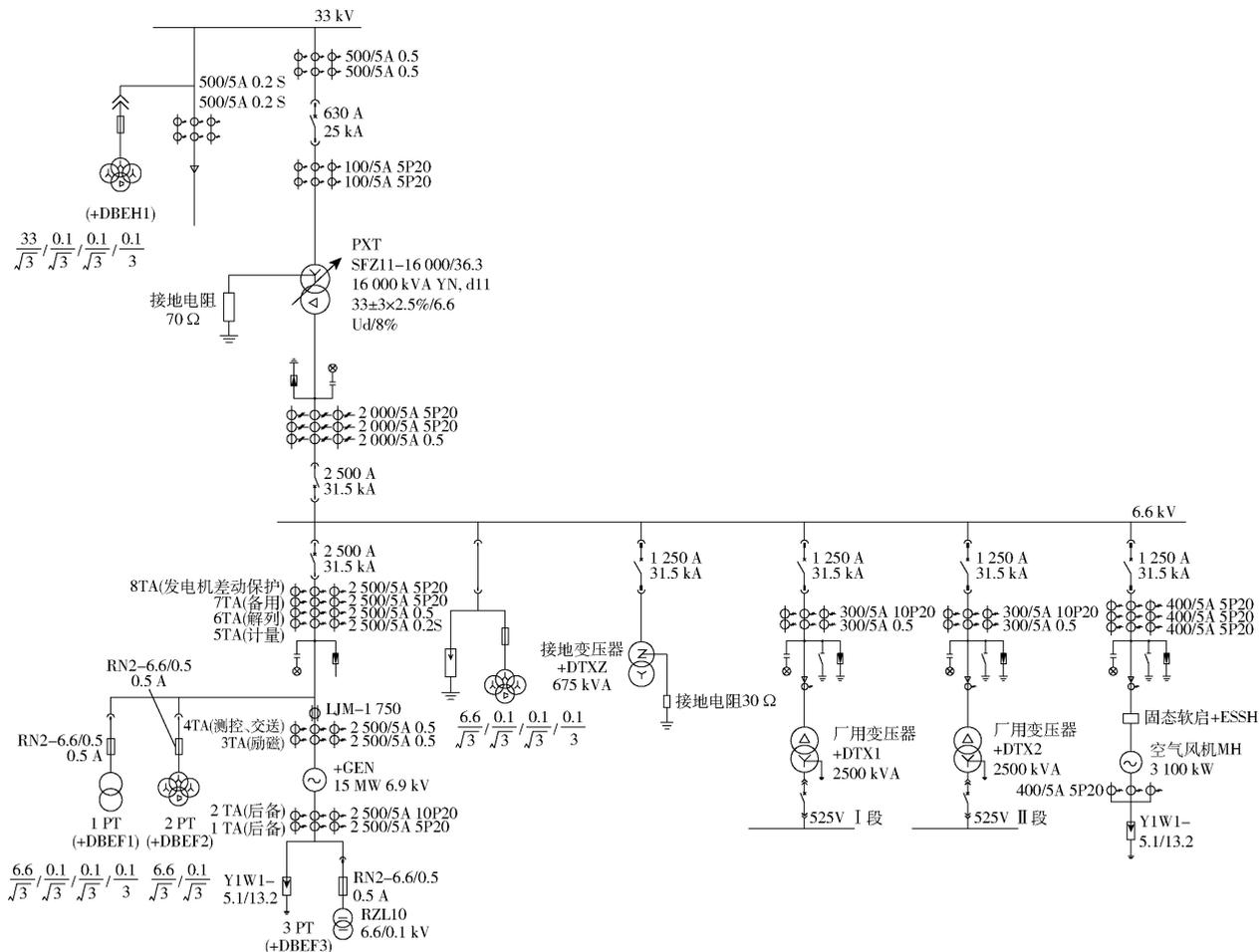


图1 全厂主接线系统图

2.2.1 33 kV 系统中性点接地方式的选择

本项目作为某大型冶炼厂内的一部分,既可以通过余热发电向冶炼厂提供电源,也可能在余热发电系统停用的情况下,作为冶炼厂的用电终端。在作为用电终端的情况下,因为本项目没有其他的33 kV 配电线路,只有一路33 kV 电缆进线连接至主变压器,此时不需要考虑中性点接地方式的问题。而在向冶炼厂提供电源的情况下,此时主变压器是一个电源端,就需要考虑它的中性点接地方式。

我国规程规定,3~10 kV 不直接连接发电机的系统和35 kV、66 kV 系统,当单相接地故障电容电流不超过下列数值时,应采用不接地方式;当超过下列数值又需在接地故障条件下运行时,应采用消弧线圈接地方式:

(1)3~10 kV 钢筋混凝土或金属杆塔的架空线路构成的系统和所有35 kV、66 kV 系统,10 A。

(2)3~10 kV 非钢筋混凝土或非金属杆塔的架

空线路构成的系统,当电压为:

①3 kV 和6 kV 时,30 A;

②10 kV 时,20 A。

(3)3~10 kV 电缆线路构成的系统,30 A。

6~35 kV 主要由电缆线路构成的送、配电系统,单相接地故障电容电流较大时可采用低电阻接地方式,但应考虑供电可靠性要求、故障时瞬态电压、瞬态电流对电气设备的影响、对通信的影响和继电保护技术要求以及本地的运行经验等。

因为对冶炼厂的电气情况不了解,无法取得单相接地故障电容电流资料,根据进线回路是电缆回路,推断整个冶炼厂区33 kV 系统的配电线路以电缆线路为主,单相接地故障电容电流可能较大,加之业主提出要求,因此33 kV 系统采用中性点经电阻接地。在主变压器33 kV 侧加接地电阻器,其参数按业主要求保证故障电流限制在300 A 以下进行选择。

(1) 接地电阻器的额定电压按下式确定

$$U_{rR} \geq 1.05 U_n / \sqrt{3} = 1.05 \times 33 / \sqrt{3} = 20 \quad (1)$$

式中 U_{rR} —接地电阻器的额定电压, kV;

U_n —系统的标称电压, kV。

(2) 接地电阻器的阻值按下式计算

$$R = U_n / (\sqrt{3} I_R) \times 10^3 = U_n / (\sqrt{3} K I_c) \times 10^3 = 33 / (\sqrt{3} \times 300) \times 10^3 = 63.5 \quad (2)$$

式中 R —中性点接地电阻器的阻值, Ω ;

U_n —系统的标称电压, kV;

I_R —电阻电流, A;

I_c —系统单相接地的电容电流, A;

K —系数, 单相对地短路时电阻电流与电容电流的比值, 一般为 1.1 ~ 1.5。

当 K 值控制在上述范围时可以限制内部过电压不超过 2.6 倍。

本项目主变压器采用 YN, d11 联结组, 在 33 kV 侧为 YN 接线, 因此在 33 kV 侧 Y 型中性点加装 25 kV, 70 Ω 接地电阻器。

2.2.2 发电机中性点接地方式的选择

发电机中性点接地方式如前所述, 也有多种方式可以选择, 对于发电机中性点直接接地系统, 当发生单相接地故障时, 接地故障电流大, 即使继电保护迅速切机, 也会对发电机造成损害。发电机中性点经低阻抗接地, 随可以部分限制单相接地电流, 但故障点接地电流幅值至少是 100 A, 在这个接地电流下继电保护快速切机, 铁芯的严重烧毁仍然不可避免。因此发电机中性点常采用非直接接地方式, 即发电机中性点不接地方式、经消弧线圈接地方式和经高电阻接地方式。

《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定: “3 ~ 20 kV 具有发电机的系统, 发电机内部发生单相接地故障不要求瞬间切机时, 如单相接地故障电容电流不大于表 1 所示允许值时, 应采用不接地

表 1 发电机接地故障电流允许值

发电机额定电压/ kV	发电机额定容量/ MW	电流允许 值/A
6.3	≤50	4
10.5	50 ~ 100	3
13.8 ~ 15.75	125 ~ 200	2
18 ~ 20	≥300	1

方式; 大于该允许值时, 应采用消弧线圈接地方式, 且故障点残余电流也不得大于该允许值。”

本项目 6.6 kV 系统单相接地故障电容电流的计算如下所示:

电网中的单相接地电容电流由电力线路和电力设备两部分的电容电流组成。

(1) 电缆线路的单相接地电容电流(A)

$$I_{Lc} = \frac{95 + 2.84S}{2200 + 6S} U_r L$$

$$I_{Lc} = \frac{95 + 2.84 \times 240}{2200 + 6 \times 240} \times 6.6 \times 0.18 = 0.25$$

(2) 发电机电容电流(A)

$$C_0 = \frac{2.5KS_{ef}\omega}{\sqrt{3}(1 + 0.08U_{ef})} \times 10^{-9} =$$

$$\frac{2.5 \times 0.0187 \times 16.5 / 0.8 \times 314}{\sqrt{3}(1 + 0.08 \times 6.9)} \times 10^{-9} =$$

$$112.63 \times 10^{-9}$$

$$I_{Sc} = \sqrt{3}\omega C_0 U_{ef} \times 10^3 =$$

$$\sqrt{3} \times 314 \times 112.63 \times 10^{-9} \times 6.9 \times 10^3 = 0.423$$

(3) 变电站电容电流(A)

$$I_{Bc} = (I_{Lc} + I_{Sc}) 18\% = (0.25 + 0.423) \times 18\% = 0.12$$

(4) 本项目电容电流(A)

$$I_c = I_{Lc} + I_{Sc} + I_{Bc} = 0.25 + 0.423 + 0.12 = 0.79$$

由计算结果可以看出, 单相接地故障电容电流很小, 不超过允许值。发电机中性点不接地方式适用于 125 MW 及以下中小机组。本项目余热发电机组容量为 15 MW, 属于这种情况。采用发电机中性点不接地方式, 并在发电机中性点装设电压为额定相电压的避雷器, 防止三相进波在中性点反射引起过电压。

2.2.3 6.6 kV 系统中性点接地方式的选择

本项目 6.6 kV 系统为发电机母线和厂用工作母线共用《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》规定: 6 kV 和 10 kV 配电系统以及发电厂厂用电系统, 单相接地故障电容电流较小时, 为防止谐振、间歇性电弧接地过电压等对设备的损害, 可采用高电阻接地方式。

本项目 33 kV、6.6 kV 电缆线路较少, 单相接地故障电容电流也很小, 根据规程可以采用中性点不接地方式或是高电阻接地方式。而业主要求的“6.6 kV 电源端中性点通过阻抗接地, 故障电流限制在 150 A 以下”, 应该是中性点经低电阻接地方

式。作者认为,可能是对于冶炼厂的系统来说,电缆线路较多,单相接地故障电容电流较大;另外本项目所在地为非洲某国家,小电阻接地系统在国外应用较为广泛,因此提出了这样的要求。考虑与冶炼厂接地方式统一,且本项目配电回路为母线和电缆,单线接地故障几率较低,因此也采用中性点经电阻接地的方式。

(1) 接地电阻器的额定电压按式(1)确定

$$U_{rR} \geq 1.05 U_n / \sqrt{3} = 1.05 \times 6.6 / \sqrt{3} = 4$$

(2) 接地电阻器的阻值按式(2)计算

$$R = U_n / (\sqrt{3} I_R) \times 10^3 = U_n / (\sqrt{3} K I_c) \times 10^3 = 6.6 / (\sqrt{3} \times 150) \times 10^3 = 25.4$$

中性点经高电阻接地的情况下,要求接地电阻流过的故障电流与不接地电网接地电容电流数值相等或略大,即 $I_R = K I_c$; 中性点经低电阻接地的情况下,接地电阻流过的故障电流很大,趋近于中性点直接接地情况下的故障电流,此时 I_R 远大于 $K I_c$ 。本项目要求 6.6 kV 故障电流限制在 150 A 以下,因此 I_R 按 150 A 计算,选择 5 kV、30 Ω 接地电阻器。

在 6.6 kV 母线没有中性点可以引出设备,因此选用 Z 型三相接地变压器来实现系统对中性点接地的要求。

(1) 接地变压器额定电压

$$U_{rT} = U_r = 6.6 \quad (3)$$

式中 U_{rT} —变压器额定一次电压, kV。

接于系统母线的三相接地变压器额定一次电压与系统标称电压一致。

(2) 接地电阻器的消耗功率

$$P_R \geq U_{rR} I_R = 6.6 \times 150 = 990 \quad (4)$$

式中 P_R —接地电阻器的消耗功率, kVA。

(3) 接地变压器额定容量

$$S_{rT} \geq P_{rZ} = 990 \quad (5)$$

式中 S_{rT} —接地变压器额定容量, kVA。

选择 1 000 kV、6.6 kV 接地变压器。

3 结论

选择系统中性点接地方式是一个综合问题,需要对概念的深入理解、并进行多种计算。系统在中性点接地方式的选择上有多种方式,每种方式考虑的侧重点不同,要根据工程实际情况,选择技术上可靠、经济上优化的方式。

[参考文献]

- [1] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,1989.
- [3] 《钢铁企业电力设计手册》编委会. 钢铁企业电力设计手册(上册)[M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
- [4] DL/T 620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [5] GB/T 14285—2006, 继电保护和自动安全装置技术规程[S].

Selection of Neutral Grounding Mode and Analysis of Calculation Cases

ZHANG Ying

Abstract: Neutral grounding operation mode in power system is a very complex issue. It is related to voltage level, single-phase grounding short-circuit current, overvoltage level and protection configuration, and it can directly affect insulation level, reliability and continuity of system power supply, communication interference and many other aspects. Combined with the design case of an overseas project, this paper introduces the selection process of neutral grounding mode and the parameter calculation of related grounding elements.

Key words: neutral grounding; grounding mode; effective grounding; ineffective grounding

