

关于余热余能发电机组中性点接地方式的探讨

刘 果

(湖南中冶长天节能环保技术有限公司,湖南 长沙 410205)

摘要:目前,余热余能发电机组通常采用直配线式接入母线的小型机组,但其接地方式选择仍沿用火力发电或电网系统的传统模式,未能充分考虑余热余能机组的特殊性。文章以某钢厂的余热余能发电机组为例,系统性地分析了不同接地方式在实际应用中的适用性及优缺点,并结合机组运行特点,提出了一套针对性的接地方式选取方法。结果表明:该方法综合考虑了系统特性、保护配合及运行可靠性等多维度因素,可为今后相关行业的余热余能机组中性点接地方式的选取提供科学依据和实践参考。

关键词:余热余能发电; 中性点接地方式; 直配线式

中图分类号: TM617

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)04-0063-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.050

Discussion on neutral point grounding methods for waste heat and energy recovery generator Units

LIU Guo

(Hunan MCC Changtian Energy Saving and Environmental Protection
Technology Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Currently, waste heat and waste energy power generation units typically adopt a direct-connected line connection to the busbar as small-scale units. However, the selection of their neutral grounding methods still follows the traditional patterns used in thermal power generation or power grid systems, without adequately considering the unique characteristics of waste heat and waste energy units. This article takes a waste heat and waste energy power generation unit from a steel plant as an example, the applicability and advantages/disadvantages of different grounding methods in practical applications are systematically analyzed. Based on the operational characteristics of the units, a targeted method for selecting grounding methods is proposed. This method comprehensively considers factors such as system characteristics, protective coordination, and operational reliability. The study demonstrates that the selection of neutral grounding methods for waste heat and waste energy power generation units should fully account for their direct-connected line characteristics and system features. The method proposed in this article provides a scientific basis and practical reference for the selection of grounding methods in similar units within related industries.

Key words: generate electricity from waste heat and energy; neutral point grounding method; direct-connected line

随着钢铁、冶金等高耗能行业对环保节能的要求不断提高,余热余能发电的应用越来越普及。由于余热余能发电的工艺本质是对余能余热进行回收再利用,这决定了机组规模大部分是30 MW

以下的小型机组,其并网接入也通常为直接接入高压母线的直配线式。此外,在钢铁、冶金等行业中,其电网有如下特点:系统接地方式多样,配电系统复杂,运行方式变化大,电能质量问题

收稿日期: 2024-08-27

作者简介: 刘 果(1983—),男,高级工程师,从事电气设计工作。

突出(谐波,三相不平衡等),且系统多为电缆出线,系统的单相接地电容电流较大。但目前大部分余热余能发电机组的中性点接地方式仍然按照火力发电或者电网系统的传统模式选取,该方式是否正确值得思考。刘其常等^[1]通过仿真比较了单元机组不同接地方式下的优劣,甘景纯^[2]从直配线式应该考虑完整系统的角度计算了各种电容电流条件下的选择方式,李大庆^[3]研究了新增余热发电机组在继电保护需考虑与原有系统之间的联系与配合。

现有研究尚未充分考虑配电网特性与保护配合的影响,特别是在完整系统视角下的选择方法仍有待深化,本文将结合以上的相关研究,针对直配线式的余热余能机组,结合其所在配电网的特点,从完整系统以及相关保护配合等角度对中性点接地方式的选择提出新的思考方式并进行探讨,建立接地方式选择的系统性评价体系,以期能够避免因局部优化而导致的系统性风险。

1 实例计算

在传统方式下,选择发电机中性点接地方式的主要依据是单相接地电容电流的大小,其目的是保护发电机,防止电流损伤定子铁心,发展成

匝间相间短路。发电机中性点接地方式分为 3 种:不接地,经消弧线圈接地,经电阻接地。在传统方式下不接地方式适用于 125 MW 及以下的小型机组,经消弧线圈接地适用于单相接地电流大于允许值的小型机组或 300 MW 及以上大机组要求能带故障运行时,经电阻接地则适用于 300 MW 及以上大中型机组^[4]。

以陕西某钢厂的烧结余热发电项目为例进行分析,该项目设铁前 35 kV 变电站一座,设置两台 S11-63000/35/10.5 kV Y/d11 主变,向烧结、球团、料场、炼钢等区域供电,相关区域设置了多座 10 kV 配电室。变电站 10 kV 系统为不接地系统。烧结余热发电机组为 18 MW,通过电缆并网至 35 kV 变电站 10 kV 母线 I 段。铁前 35 kV 变电站主接线示意图如图 1 所示。

为了确定发电机中性点的接地方式,首先需要对所属系统的电容电流进行计算。35 kV 主变采用 Y/d11 接线方式两种电压等级之间产生了隔离,同时由于发电机组采用直配线式接入母线,机组与整个 10 kV 系统通过电缆产生了电联系,形成了一个整体。因此需要对该变电站下属所有 10 kV 电缆出线进行统计。考虑到本站 10 kV 系统电缆回路数量多,规格型号不同,本文为了方便直观

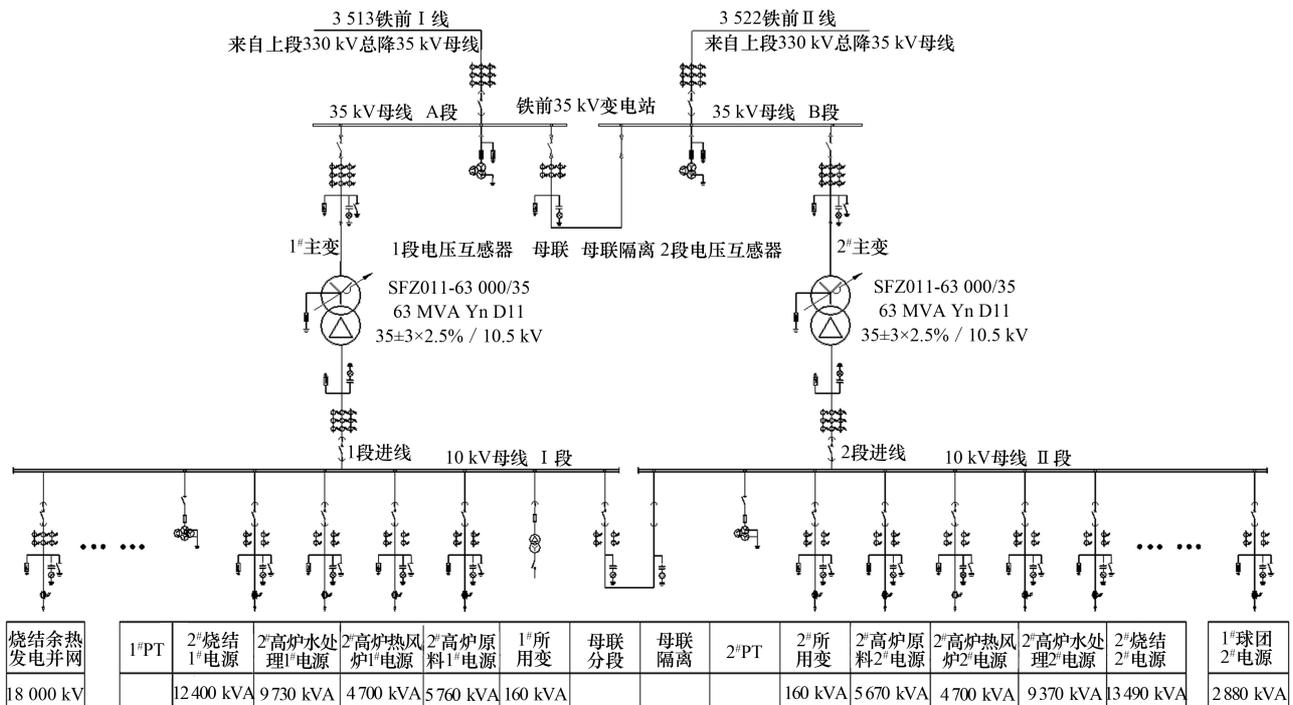


图 1 铁前 35 kV 变电站主接线示意

地展现在统计时采用取整的粗略估算方法，产生的误差不会对后续计算分析有颠覆性影响。回路统计如表1所示，考虑到变频器与软启动的隔离作用，相关回路的电缆不考虑在计算范围内。

表1 10 kV 系统电缆回路统计

名称	10 kV I段/回	10 kV II段/回	长度/m
35 kV 变电站	12	12	400 ~ 3 100
烧结区域	16	15	50 ~ 500
料场区域	10	8	50 ~ 600
球团区域	11	9	100 ~ 500
高炉区域	8	7	50 ~ 400
炼铁其他区域	10	7	100 ~ 300

本系统在建设初期时考虑一台主变带全部负荷的要求，但经过不断的扩建，目前总负荷已经超过单台主变的容量。因此在进行电容电流的计算时，应按照目前系统实际运行时真实存在的最大方式，即1台主变带3个区域(烧结、球团、高炉)全部负荷运行时的工况。据此将该工况运行下的电缆总长按照取整的方式统计如表2所示。

表2 电缆长度统计

名称	10 kV I段	10 kV II段	长度/m
35 kV 变电站	9 回	0	6 900
烧结区域	16 回	15 回	7 900
球团区域	11 回	9 回	6 100
高炉区域	8 回	7 回	3 200

在最大方式下电缆总长约为24.1 km。因本系统为不接地系统，为了简化计算采用估算公式^[4]。电容电流为

$$I_c = U(35L_1 + L_j)/350 \quad (1)$$

式中： U 为网络线电压，kV； L_1 为电缆线路长度，km； L_j 为架空线路长度，km。

将数值代入得到，考虑配电的装置的增加，考虑配电的装置的增加。此值已经大于规范要求的4 A限制，若按照传统的选择方式，应选用中心点经消弧线圈接地方式。结合本系统的特点下面会对3种接地方式一一进行分析，以论证传统的选择方式是否合适。

1.1 消弧线圈

(1) 问题一：消弧线圈只针对工频接地电流补偿。在钢铁冶金等行业中其电网中存在大量的

非线性设备如变频器、电炉、变压器、电抗器等，因此谐波问题突出。根据该站在运行初期进行的电能质量检测报告，可以发现虽然所测谐波次均未超出国家标准，但基本已经接近限值，而且随着后续项目的扩建，部分奇次谐波如5次，7次可能已经超出规定值。这些高次谐波在发生单相接地故障时被叠加，在某些情况下可能超过基波^[5]，再加上接地电容对高次谐波的放大作用，使得接地产生的电弧无法迅速熄灭，会对发电机产生损坏。因此不能带故障继续运行，应动作于停机。

(2) 问题二：消弧线圈对不平衡电压的放大作用。在电网阻尼率一定的情况下，系统中性点电压的大小与脱谐度有关，脱谐度越小，中性点电压越高^[4,6]。由于钢铁冶金等行业中其电网由于负荷的原因三相不平衡问题较其他电网要大，因此在投入消弧线圈后会加剧系统的不平衡。以铁前35 kV变电站为例分析，根除初期进行的电能质量检测报告，其原有电压不平衡度I段为0.35%，II段为0.41%，在投入消弧线后若减少脱谐度，发电机的中性点不平衡电压会变高，引起保护的误动作；若放大脱谐度，在单相接地时故障点的残流也会加大，使得电弧难以熄灭^[1]。同时由于系统分配电室较多，运行方式变化较大，采用谐振接地时系统只有一台消弧线圈，无法实现系统的分区运行，其调节会较为频繁，对于参数如脱谐度的设置很难做到有针对性，会给机组及系统的运行带来不稳定因素。

(3) 问题三：由于消弧线圈的加入，改变了原有系统的接地方式，从不接地方式变成了谐振接地。因此会带来系统配置及保护上一系列的变化，导致原有系统的各种保护功能无法正确动作。铁前35 kV变电站的10 kV母线安装有接地选线装置，基于不接地方式的稳态量的选线检测。而消弧线圈的加入，当发生接地故障时由于其过补偿作用，对原有选线装置产生干扰，使得其可能存在不动作、误动作等情况，需要对其改造。同时各回路设置的接地保护功能也可能由于接地方式的改变导致原有保护功能与定值需要进行调整。

(4) 问题四：这也是最值得考虑的部分，余热余能发电厂作为自备电厂，其本质是对余热余

能的回收利用,因此机组的运行不具备稳定可靠的特点,其运行根据前序工艺段各类参数的变化存在不稳定性,如受制于烧结生产运行及负荷率等,存在经常停机的情况。由于消弧线圈的设置是针对于发电机本身而不是系统,这将会导致整个系统在不接地与谐振接地之间不停切换,从而使系统变得不稳定,由此带来更多不可预见的隐患与危险因素。

由此分析可以得出,在本例中采用消弧线圈虽然能起到补偿作用降低工频电容电流,但由于谐波问题不能带故障持续运行,失去了其原本的优势。同时由于系统存在不同运行方式的调整因此还会带来加剧不平衡电压,发生谐振,引起系统不稳定等更严重的后果。

1.2 不接地

发电机中性点不接地方式其主要在电容电流小于允许值时能带故障运行大大提高供电可靠性。但在本系统下接地电流已经超过了规范要求的允许值,若仍要采用不接地方式,需按照《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》(GB 50062—2008)的规定,当发电机为直接接入母线型式时应装有选择性的接地保护装置,且应动作于停机。

(1) 问题一:因为整个系统通过电缆进行了电联系,当系统中某一处发生了单相接地故障时会产生零序电压,同时会在系统内进行传导。而发电机的定子保护基波零序是以零序电压作为判据的,其无法判断故障发生地是区内还是区外,只能根据传导过来的电压大小进行相应动作,难以整定,失去了选择性也容易产生误动,使得机组的运行可靠性降低。

(2) 问题二:本系统中电容电流较大对于单相接地时产生的弧光过电压很难抑制,即使第一时间切机,由于电容电流的作用接地电弧并不能立马熄灭,并存在反复重燃的情况,而这种过电压会对发电机及其绝缘造成较大损害。

在本案例中采用不接地方式虽然没有改变原有系统的接地方式,但由于系统总的电容电流超标,使得该方式的带故障运行的优势无法实现,且其存在的缺点依旧突出。

1.3 经电阻接地

无论时高电阻接地还是低电阻接地,其都是

利用阻性电流来抑制单相接地时的过电压,因此能加快电弧的熄灭。同时还具有不放大不平衡电压的等特点。

(1) 问题一:由于阻性电流不像消弧线圈那样提供是方向相反的感性电流能够抵消容性电流,而是通过矢量叠加,使得总的故障电流要大于容性电流。

对于低电阻接地,由于会呈几何倍地放大故障电流,甚至高达几百安培。即使动作于切机,由于保护及断路器的固有动作时间,加上汽轮机惯性作用,去磁时间常数大,故障电流仍会持续一段时间,这种故障电流已经远远超过发电机所能承受的数值与持续时间,会造成严重的损坏^[7]。同时故障引起得地电位升高,产生的跨步电压也需要进行验证,危险性极大。所以经低电阻接地并不适用于直接接入系统的发电机组。

经高阻接地,一般为经变压器高阻接地,以本案为例按照规范及手册公式^[1-2]计算可以得到,流过接地电阻的阻性电流:

$$I_R = 1.1 I_c = 1.1 \times 29.35 = 32.29 \text{ A} \quad (2)$$

则总故障电流:

$$I_G = \sqrt{I_R^2 + I_c^2} = \sqrt{32.29^2 + 29.35^2} = 43.63 \text{ A} \quad (3)$$

可以发现通过矢量叠加对总的故障电流放大有限,不会像低电阻接地那样即使动作于停机也会因为惯性会对发电机造成严重损坏。

(2) 问题二:同样由于系统分配电室较多,运行方式变化较大,对于参数的选择与运行的调节很难做到有针对性,由此会带来一些不便,但不会像消弧线圈那么严重。

(3) 问题三:同样存在对于发电机而言无法判断故障发生地时区内还是区外,存在失去选择性,降低机组运行可靠性的问题。

高阻接地的方式与原有系统不同,同样存在改变了原系统接地方式的问题,但在本案例中考虑到对于系统选线装置采用的原理及对其他相关保护的影响较小,对原有配置无需调整,且不会产生如谐振等不利因素,反而在投入期间发生单相接地时能降低闪弧过电压,对于系统而言由于放大了故障电流在一定程度上能提高选线的准确率,

因此处于可接受范围。

2 案例接地方式选择与思考

通过以上3种中性点接地方式的对比,可以得出,在本案例中选择经消弧线圈接地是不合适的。考虑到余热余能发电仅为自备电厂,其运行本身就不具备稳定的特点,因此运行的可靠性在选择时不应作为主要的依据,应当首要考虑与原有系统的结合与影响。

因此可优先采用经高电阻接地,其次为不接地系统。而之所以按照传统方式来选择不合适,这是因为相关手册规范均是基于大中型机组,应用场景为火力或者水力发电,采用发变组或者单元联合等接线,由于有升压变的隔离作用仅需考虑本机组及相关厂用电范围内的系统,无需考虑所接入系统的相关情况。而相关手册中提及的经电阻接地是适用于大型机组,这也是因为大型机组本身对地电容较大,单相接地电流的允许值也更小。

同样可以进行延展思考,假如本站10 kV系统采用电阻接地方式,此时发电机中性点若仍采用高电阻接地,可以分析出由于电阻的并联,总的接地阻值会再降低,在发生单相接地故障时总的故障电流会再次放大,等同于小电阻或中电阻接地,那么该方式将不再合适。采用消弧线圈接地方式,在前面问题的基础上由于引入了新的参数,会使得系统的变化更加难以预测,不确定性增加。而采用发电机中性点不接地方式,其不但不会改变原有系统的接地方式,也不会放大总的故障电流。并且由于原系统的电阻接地已经能限制接地产生的过电压,使得故障发生动作于停机时接地电弧能快速熄灭。因此在该情况下采用发电机中性点不接地方式反而是最合理的。

3 结 语

通过实际案例分析发现,目前采用直接接入

高压母线的直配线式余热发电机组仍沿用传统中性点接地方式的选取方式,未能充分考虑其特殊性。针对这一问题,本文提出了一种新的选择思路:在选择中性点接地方式时,不仅要考虑机组自身的电容电流,更要从系统整体角度出发,综合评估整个系统的电容电流特性;同时,由于余热余能项目多为增建或配套项目,还需将所接入系统的现有接地方式、典型运行方式以及设备配置情况纳入考量范围。值得注意的是,不同电网特点和接地型式对发电机组中性点接地方式的要求存在显著差异,因此不能简单沿用传统经验或固定模式进行选择。此外,接地方式的选择不仅涉及技术指标的分析,还需兼顾经济性评估,在必要时可将运行操作的复杂度等因素纳入综合考量。本文提出的新方法为直配线式余热发电机组中性点接地方式的选择提供了系统性解决方案,能够有效提升选择的科学性和适用性。

参考文献:

- [1] 刘其常,胡少强,刘蔚. 发电机中性点接地方式探讨[J]. 继电器,2005,33(13):87-91.
- [2] 甘景纯. 小型自备电厂发电机直配线中性点接地方式选择[J]. 电力勘测设计,2023(5):79-82.
- [3] 李大庆. 水泥厂余热发电站发电机定子接地保护[J]. 水泥技术,2017(5):92-95.
- [4] 《电力工程设计手册》编委会,火力发电厂电气二次设计[M]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [5] 导体和电气选择设计规程:DL/T 5222—2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022.
- [6] 赵晓丽,韩艾强,王峰,等. 对消弧线圈若干问题的探讨[J]. 电力学报,2007,22(1):75-78.
- [7] 陈亮,李耕,张晓峰. 船用中压发电机中性点接地电阻的整定计算[J]. 船电技术,2015,35(4):9-12.
- [8] 要焕年,曹月梅. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000.