

适用于数据中心的多台并列直配柴油发电机的中性点接地及保护配置方案

赵亮亮, 高凤荣

(中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

摘要: 方案的阐述基于一个由多台并列柴油发电机、高压电缆、降压变压器和高压电动机构成的微电网系统。该微电网系统适用于数据中心、机场、采矿区或采油平台等场合。发电机接地电容电流若超过限值很容易损害发电机定子绝缘。为此, 介绍了一种柴油发电机中性点接地方案及微电网保护的配置方案, 分析了该中性点接地形式、保护配置和主要保护的整定计算。此方案已在项目中实施运行并取得了良好的运行结果。

关键词: 数据中心; 微电网; 柴油发电机; 高阻接地; 接地保护

Neutral grounding method and protection co-ordination on several direct-connected diesel generators for data center

ZHAO Liangliang, GAO Fenrong

(China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Description of the scheme is based on a power micro grid composed of several diesel generators, cables, step-down transformers and motors. The micro grid system is suitable for data center, airport, mining area or oil production platform. If the grounding capacitance current of generator exceeds the limit value, it is easy to damage the insulation of generator stator. Therefore a kind of neutral grounding scheme of diesel generator and configuration scheme of micro grid protection is introduced. The neutral grounding form, protection configuration and setting calculation of main protection are analyzed. This scheme has been implemented in the project and achieved good results.

Key words: data center; micro grid; diesel generator; high resistant grounding; grounding protection

0 引言

某铜矿区按照分离、浮选、冶炼和辅助工艺等不同的功能, 可分为原矿区、破碎区、主工作区(浮选和冶炼)、脱水区、辅助区和发电厂区。在每一个区设置了1~2台降压变压器, 在主工作区安装2台高压同步电动机。矿区距离城市很远, 无法从当地电网获得电能, 因此在矿区内设置了由柴油发电机构成的发电厂, 再通过聚乙

烯电缆向电动机或变压器供电。

1 电气主接线

矿区生产线的运行时间为350天, 每年的检修期为15天。依据负荷的统计数据和输送功率的损失, 运行期最大负荷为8 358 kW, 最小负荷为7 706 kW。而检修期照明、消防泵和维修所用的负荷大约为600 kW。考虑到柴油发电机在海拔

1 700 m和40 ℃气象条件下降容,因此选择了8台额定功率为1 600 kW的柴油发电机,7用1备。

8台发电机分别连接到10.5 kV母线 I 和母线

II 上,各功能区的变压器也分配到母线 I 和母线 II 上,正常运行时分段开关闭合,特殊情况时断开,主接线图如图1所示。

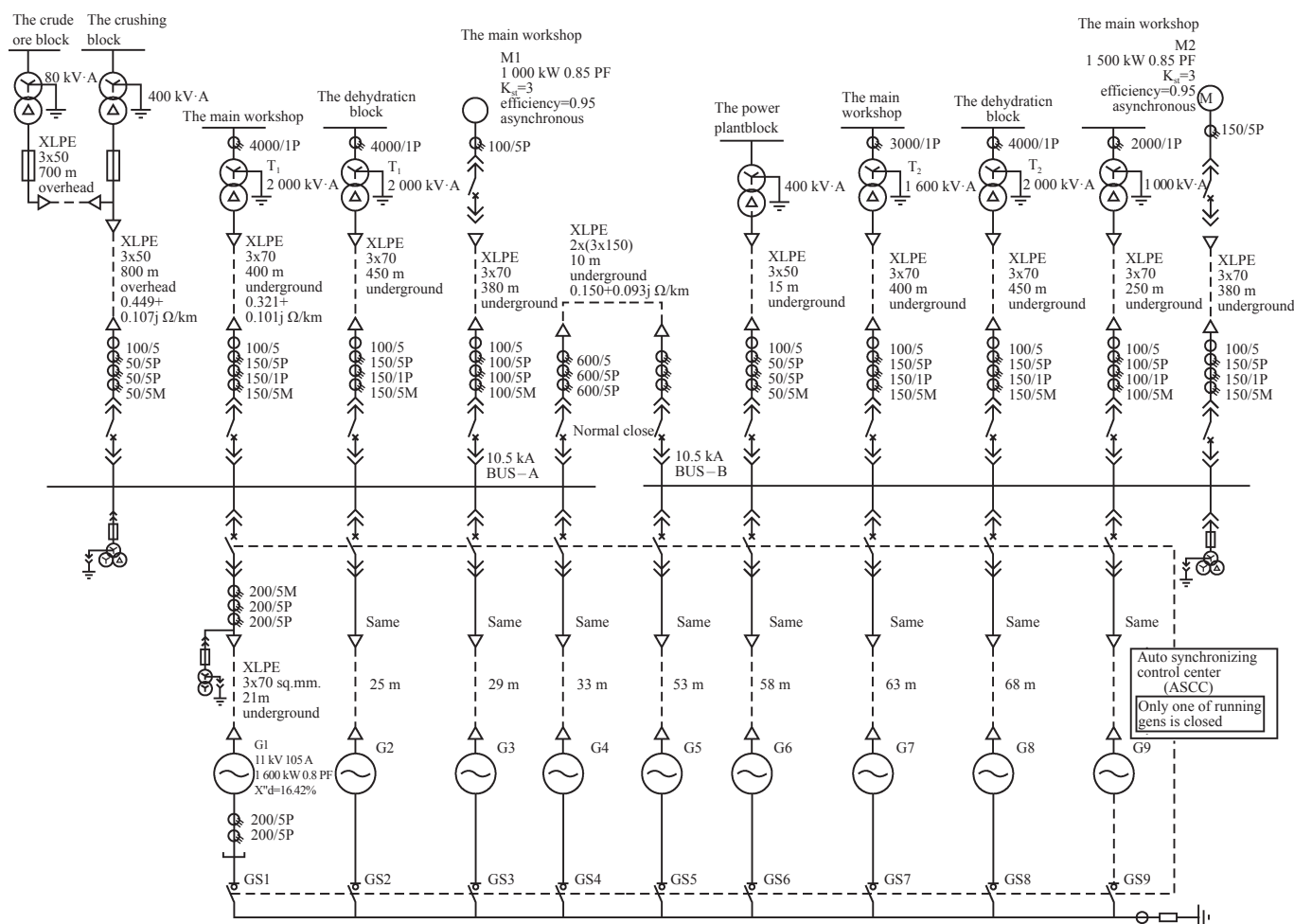


图1 主接线图

Fig. 1 Main wiring diagram

该微电网方案选用了高电阻接地方式,并没有选择低电阻接地、消弧线圈接地、接地变压器接地和不接地等其他接地方式,是因为当单相接地故障发生时,高电阻始终保持了一个较小的故障电流,可以减少定子绝缘的损坏。

图2为图1的简化,表示了一个2台发电机、3条电缆馈线以及一台发电机中性点通过电阻接地的微电网系统,其中2号馈线L1相发生单相接地故障。单相接地故障电流($I_f=I_{a3}$)中性点的电阻电流由来自发电机、变压器、电缆和其他设备的电容电流构成。

在图1的微电网中电缆总线长度大约为

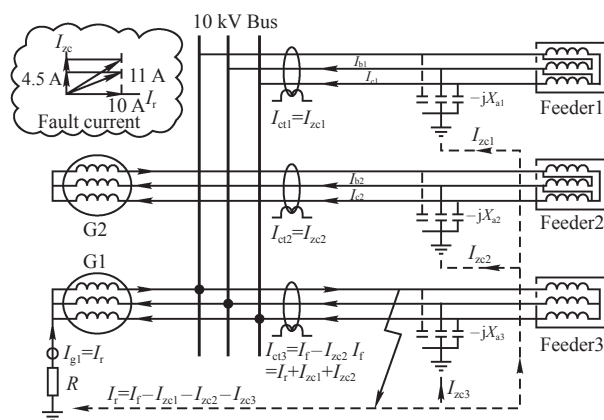


图2 中性接地方法和故障电流

Fig. 2 Neutral grounding method and fault current

4.21 km, 在10.5 kV段每千米通过 $3 \times 70 \text{ mm}^2$ 聚乙烯电缆的相接地电容电流为0.9 A, 考虑由发电机和变压器提供20%的附加电容, 所以该系统的电容电流为: $I_c = 4.21 \times 0.9 \times 1.2 = 4.5 \text{ A}$ 。

微电网中电缆的增加是无法避免的, 中性点通常使用消弧线圈或电阻器来削弱故障时电容电流的影响, 同时零序保护的定值也容易做到。倘若所有的发电机通过消弧线圈或电阻器接地, 随着运行发电机台数的变化, 接地故障电流也发生变化。

因此首先规定: 不管是通过消弧线圈还是电阻器接地, 运行的发电机中仅有一台中性点接地。最终选择电阻器接地的原因有两个: 一是为避免发电机的定子绝缘发生损害, 发电机允许的电容性接地故障电流的限制; 二是随着电缆数量的增加, 采用消弧线圈过补偿的系统电容电流容易逼近电感电流而产生并联谐振, 采用消弧线圈欠补偿的系统使得消弧线圈削弱电容电流的能力下降。相比之下, 系统采用电阻接地时只要电阻达到一个合理的值使得电阻电流在接地故障电流起主要作用, 就很容易处理零序保护的设置, 并保持电弧接地故障维持在较小的水平上。

图2中的云图为故障电流的向量图。显然, 一旦电阻电流设定在10 A时, 就能够计算中性点的接地电阻值, 计算公式为

$$R = V_{an} / I_r \quad (1)$$

式中, V_{an} 为相电压; I_r 为电阻电流; R 为中性点电阻。

由式(1)可得, $R = (10.5 / 1.732 \times 10) = 606 \Omega$ 。除了接地电阻(NGR)设置为606 Ω 以外, 为了保证运行的发电机中仅一台发电机接地, 实践中通过发电机控制中心系统自动控制中性点侧电动隔离开关来实现这一目标。

2 保护配置

保护配置如图3所示。微电网中的主要保护配置遵循以下保护功能。

1) 对发电机的保护方案: 高频(81H)、低频(81L)、低电压(27)、高电压(59)、负

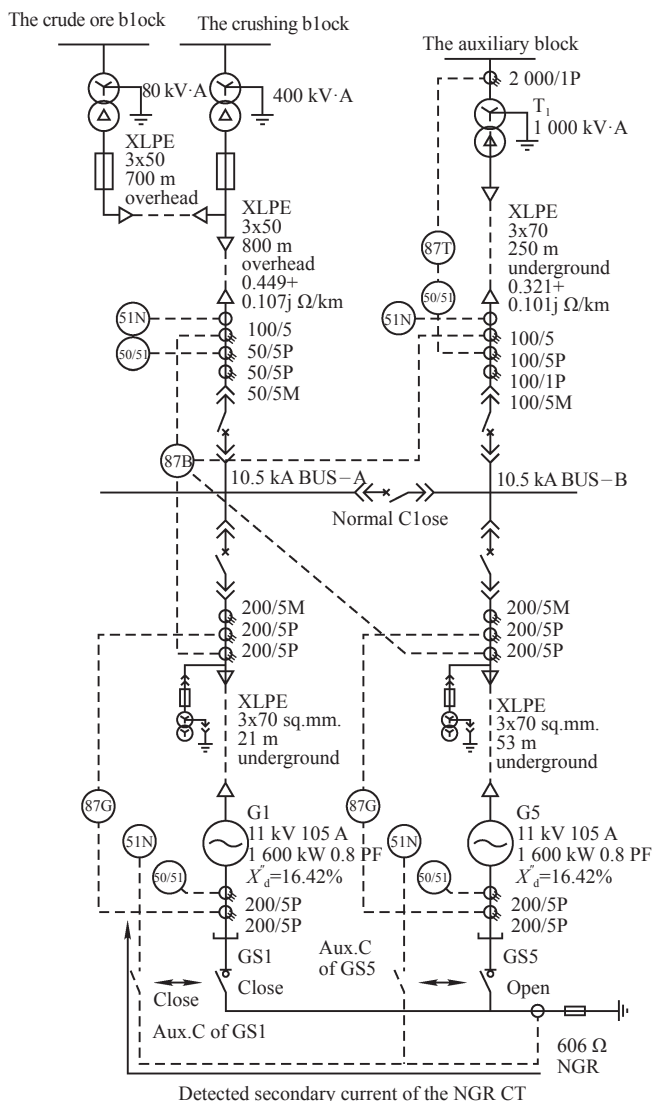


图3 保护配置

Fig. 3 Protection co-ordination

序(46)、差动(87G)、逆功率(32P)、定时限过电流(50/51)、反时限过电流(50/51)、接地过电流(50/51N)和非电量保护。

2) 对1 000 kV·A以上的变压器的保护方案: 差动(87T)、过电流(50/51)、接地过电流(50/51GN)和非电量保护。

3) 对1 000 kV·A以下的变压器的保护包括: 过电流(50/51)、接地电流(50/51N)和非电量保护。

4) 对高压电动机的保护方案: 过电流(50/51)、接地电流(50/51GN)和非电量保护。

5) 对母线和分段断路器的保护方案: 差动电流(87B)。

运行的发电机中, 接地过电流 (50/51NN) 保护由发电机控制中心 (ASCC) 控制的中性点电动隔离开关的辅助常开触点通过NGR的CT获得检测电流, 其他运行的不接地的发电机通过该隔离开关的辅助常闭接点闭锁CT不获得检测电流。也就是说, 尽管所有的发电机做了接地过电流保护, 仅继电器检测的故障电流在到达设定的时间后发电机发出跳机命令。

3 故障电流的计算

在电力系统中, 过电流保护的配置需要根据保护定值和时间两个方面进行整定。在本微电网中, 故障电流的计算需要以下前提和假设。

1) 考虑电网中电缆的电阻。

2) 两相超瞬态电流是三相超瞬态电流的0.866倍, 即 $I''_{k2}=0.866I''_{k3}$ 。

3) 当故障发生在远离发电机时, 两相稳态故障电流是三相稳态故障电流的0.866倍, 即 $I_{k2}=0.866I_{k3}$ ^[2]。

4) 运行中的电动机在故障发生时, 会向故障点提供一定的反馈电流。

此外, 保护整定计算需要计算最大、最小运行方式的故障电流。当最大和最小故障电流有比较大的差异时, 由于灵敏度和保护范围没有达到要求, 因此很难计算保护设置值。例如该微电网就是一个很好的例子, 从1[#]~8[#]发电机有8种运行方式。

当一台发电机运转时, 仅2 000 kV·A及以下的变压器可能被使用。发电机出口的三相故障电流的初始值为639 A, 1 000 kV·A及以上的变压器的瞬时过电流保护在如此小的故障电流下不能满足灵敏度的需求, 因此替代过电流保护, 选择的差动电流保护作为主保护, 以便提高主保护的灵敏度。

辅助区的1 000 kV·A变压器的基本参数如表1所示。表2中, 柴油发电机厂提供的发电机出口短路电流按衰减时间0~0.9 s分别给出, 例如在0.00 s为639 A, 在0.02 s为593 A, 在0.9 s为226 A。

表2中, T 为衰减时间; G_{en} 为一个出口的三

表1 辅助区的变压器的技术参数

Tab. 1 Parameters of the transformer at the auxiliary block

参数	数值	Comments
$S/kV \cdot A$	1 000	
V_{CTR}	Dyn11	
I_{rateH}/A	55.0	Primary side of T
I_{rateL}/A	1 443.4	Secondary side of T
I_{nH}/A	0.549 9	CT secondary
I_{ref}/A	0.721 7	CT secondary
I'_{1k3min}/A	638.5	

表2 最小故障电流下的短路电流 (1台发电机运行时)

Tab. 2 Short-circuit current at the minimum operation (1 running generator)

T	G_{en}	MVA	Z_{LG}	M_1	M_2	I_{ft}
0.00	639	11.62	0.007 1	0	0	638.5
0.02	593	10.78	0.007 1	0	0	592.6
0.04	560	10.18	0.007 1	0	0	559.6
0.10	500	9.09	0.007 1	0	0	499.7
0.20	441	8.02	0.007 1	0	0	440.8
0.40	356	6.47	0.007 1	0	0	355.9
0.90	226	4.11	0.007 1	0	0	225.9

相短路电流; MVA为短路功率; Z_{LG} 为发电机母线间的电缆阻值; M_1 、 M_2 分为故障发生时电动机1和电动机2的反馈电流; I_{ft} 为母线故障位置的三相故障电流。

从表1、表2可以看出, 差动电流的瞬时值的计算公式为

$$I_{diff>>} = (5 \sim 6) \times I_{ref} \quad (2)$$

式中, I_{ref} 为在变压器二次侧的电流互感器二次电流参考值。

由式(2)可得, $I_{diff}=5 \times 0.721\ 7=3.61\ A$, 然而由于 K_m 小于安全值, 所以其灵敏度是不够的。计算公式为

$$K_m = (I'_{1k2min} / n_{1diff}) / I_{diff>>} = 10.866 \times (I'_{1k3min} / n_{1diff}) / I_{diff>>} \quad (3)$$

式中, I'_{1k2min} 、 I'_{1k3m} 分别为在变压器馈线出口处的瞬时两相故障电流和瞬时三相故障电流; n_{diff} 为差动电流保护高压侧的CT比值。

由式(3)可得, $K_m=(0.866 \times 638.52/100)/3.7=1.49$, 则 $K_m < 2.0$ 。

同样当一台发电机运行时, T形接线分别在原矿区80 kV·A变压器和碎块区400 kV·A变压器的瞬时过电流保护也不能满足灵敏度的要求。通过计算, 瞬时过电流保护灵敏度为1.04, 小于灵敏度1.5的要求。而过电流保护灵敏度为3.92,

大于灵敏度1.5的要求。从而得出结论,当一台发电机向变压器供电运行时,应该尽量避免这种主保护灵敏度低的运行方式。

根据发电厂提供的发电机数据,电压下降5%、功率因数为0.4的发电机空载起动能力为531 kV·A。起动1 000 kW的电动机需要5台这样运行的发电机。所以2台发电机运行时,高压电动机不能起动,在故障发生时也不能向故障点提供反馈电流。当8台发电机运行时,电动机则可以提供反馈电流。

例如,从发电厂到破碎区、再到原矿区变压器的电缆敷设距离为1.5 km,采用了T形接线(见图1)。表3、表4分别为最小、最大运行方式下的故障短路电流。表5为T形接线的基本参数。

表3 最小故障短路电流(2台发电机运行)

Tab. 3 Short circuit current at the min operation (2 running generators)

T	G_{en}	M_1	M_2	I_f	Z_L	I_{fp}	Z_T	I_{fs}	$I_{fs'}$
0.00	639	0	0	1 276	0.37	1 186	11.0	9 857	376
0.02	593	0	0	1 184	0.37	1 106	11.0	9 637	367
0.04	560	0	0	1 118	0.37	1 049	11.0	9 465	361
0.10	500	0	0	998	0.37	943	11.0	9 112	347
0.20	441	0	0	881	0.37	837	11.0	8 708	332
0.40	356	0	0	711	0.37	682	11.0	7 991	304
0.90	226	0	0	451	0.37	440	11.0	6 413	244

表4 最大故障短路电流(8台发电机运行)

Tab. 4 Short circuit current at the max operation (8 running generators)

T	G_{en}	M_1	M_2	I_f	Z_L	I_{fp}	Z_T	I_{fs}	$I_{fs'}$
0.00	639	204	306	5 592	0.37	4 188	11.0	12 643	482
0.02	593	204	306	5 229	0.37	3 981	11.0	12 551	478
0.04	560	204	306	4 967	0.37	3 827	11.0	12 477	475
0.10	500	204	306	4 492	0.37	3 539	11.0	12 320	469
0.20	441	204	306	4 024	0.37	3 241	11.0	12 130	462
0.40	356	204	306	3 349	0.37	2 788	11.0	11 762	448
0.90	226	204	306	2 315	0.37	2 032	11.0	10 786	411

表3、表4中, Z_L 为母线至变压器之间的阻抗; Z_T 为变压器的阻抗; I_{fp} 、 I_{fs} 分别为变压器一

表5 T形接线的基本参数

Tab. 5 Base parameters of the tapped line

NAME	The crushing block
I_{rateH}/A	21.99
I_{rateL}/A	577.37
NAME	The crude ore block
I_{rateH}/A	4.40
I_{rateL}/A	115.47
I_{maxL}/A	26.39
I_{nH}/A	2.64
I'_{1k3min}/A	1 276
I_{3k3min}/A	244
I'_{3k3max}/A	482

次侧和二次侧的故障电流值, $I_{fs'}$ 为二次侧转换到一次侧的故障电流值;在最大、最小运行方式下, I_{fs} 分别由 I'_{3k3max} 和 I_{3k3} 表示。

三相过电流保护的计算设置值在确定时间有可靠的灵敏度,在CT的二次侧的设置53 A(0 s),3.5 A(0.5 s)。

$$\begin{aligned}
 I_{dtoc1} &= K_{rel} K_c I'_{3k3max} / n_{1ph} = 53 \text{ A} \\
 K_m &= I'_{1k2min} / I_{dtoc1} / n_{1ph} = 2.09 > 1.5 \\
 I_{dtoc2} &= K_{rel} K_c K_{ol} I_{maxL} / (K_{ret} n_{1ph}) = 3.5 \text{ A} \\
 K_m &= I_{3k2min} / (I_{dtoc2} n_{1ph}) = 6.05 > 1.5
 \end{aligned} \quad (4)$$

过电流保护配合主要通过协调上下级保护的电流和时间的整定值来进行。一是整定电流的协调。上下级保护装置电流整定值是源于故障电流随着电源点和故障点之间的阻抗值的不同而改变,设置适当的整定值,当故障发生接近整定电流值时能切断故障。二是脱扣时间的协调。在一定的时间点上,系统中的每一个保护都能检测到故障电流而开始启动,通过控制不同的整定时间,能确保接近故障的断路器首先断开而排除故障电流。三是综合电流和时间的协调。例如:所有变压器或电动机馈线出口的接地过电流设置值均为4 A(0.4 s),发电机和母线分段开关的设置值为6 A(0.6 s)。所有过电流保护均设置为定时限过电流保护,10.5 kV母线上游和下游之间保护配合主要为馈线侧时间为0.6 s和发电侧时间为0.8 s。

在微电网的调试中,保护装置的整定值必须

正确。因为在建设过程中或多或少会产生各种人为错误，微电网一旦带电并向故障的设备送电，相关的保护必须能够迅速地检测并通过断路器切断，以便保护设备和人身安全。例如，在调试过程中，主工作区的第二台变压器第一次送电发生了故障，差动保护动作跳闸。现场调查发现是因为主工作区的第一台变压器已经送电完成，而第二台变压器的布置与第一台成对称布置，施工人员错误的将L3相导体认为是接地线接入变压器二次侧的N排上。经整改后，送电成功。可见，正是保护定值设置正确，才避免了设备损坏和人员伤害。

4 结束语

对于由多台直配发电机、电缆、降压变压器和电动机组成的微电网，对接地实施方面和保护配置作了如下总结。

1) 本文介绍的多台并列柴油发电机构成的微电网系统适用于数据中心、机场、采矿区或采油平台等。

2) 在微电网中，为了降低弧光接地故障，高电阻接地是一种可行的且有效的解决办法。

3) 通过发电机控制系统的控制，在每个发电机中性点设有一个电动隔离开关，能保证运行发电机中仅有一台发电机通过高电阻接地。

4) 以上两条是非常重要的，在这种前提下，保护配置方案和设置是很容易做到的。

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[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] FULCZYK M, BERTSCH J. Ground-fault currents in unit-connected generators with different elements grounding neutral[J]. IEEE Transactions on Energy Converseon, 2001, 21(12): 67.
- [3] ZHANG Qixue, WANG Weijian, WANG Xiangheng. Proper selection of neutral grounding resistor of the large-sized hydro-generator in Three Gorges Power Plant[J]. Relay, 2005, 33(15): 5-8.

作者简介



赵亮亮

赵亮亮(1976-), 男, 硕士, 中国勘察设计协会电气分会双高专家, 研究员级高工, 国家注册电气(发输变电)工程师, 主要研究方向为可再生能源电气设计。

(收稿日期: 2020-05-29) **EA**