

10 kV 低电阻接地系统在石油化工企业的应用

卢丙仕

(中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要: 为了正确认识单相接地故障的危害性, 并将其不良后果降到最低限度, 依据国家和行业现行有关标准规范规定, 借鉴有关文献的理论分析结果, 结合石油化工企业 10 kV 配电系统的特点, 从抑制单相接地故障间歇性电弧过电压的水平、单相接地故障继电保护的可靠性、地电位升高对人身和低压电气设备的安全性以及电信线路遭受电磁感应电压的允许限值等诸多方面进行综合分析, 归纳总结出适合石油化工企业的 10 kV 低电阻额定容量取值范围; 肯定了目前既有项目 10 kV 低电阻工程设计值的合理性; 阐释了低电阻接地系统对石油化工企业大型 10 kV 配电系统的动态稳定性和可靠性是有益的, 并且完全满足石油化工企业安全稳定连续生产的要求。

关键词: 中性点接地方式; 低电阻接地系统; 系统电容电流; 单相接地故障; 间歇性电弧接地过电压; 过电压保护及绝缘配合

Application of 10 kV low resistance grounded system in petrochemical companies

LU Bingshi

(Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to correctly understand the harm of single-phase grounding fault and minimize its adverse consequences, according to the current national and industry standards, the theoretical analysis results of relevant literatures, and the characteristics of the 10 kV power distribution system of petrochemical enterprises, this paper has analyzed the level of suppressing intermittent arc overvoltage of single-phase ground fault, the reliability of single-phase ground fault relay protection, the insurance of safety of personal and low voltage electrical equipment while ground potential increases, the allowable limit of electromagnetic induction voltage for telecommunications lines, etc. This paper summarizes the rating range of 10 kV low-resistance for petrochemical enterprises, confirms the rationality of 10 kV low-resistance values in current engineering design, explains that the low-resistance grounding system is beneficial to the dynamic stability and reliability of large 10 kV distribution system of petrochemical enterprises, it fully meets the requirements of safe and stable continuous production of petrochemical enterprises.

Key words: neutral grounding mode; low-resistance grounding system; system capacitive current; single-phase grounding fault; overvoltage of intermittent arc ground; overvoltage protection and insulation coordination

0 引言

中性点经低电阻接地是中压配电系统多种

中性点接地方式之一, 通常情况下, 是在中压配电系统电源端降压变压器低压侧中性点串联接入阻值较小的电阻器 (以下简称低电阻),

并可靠接地,中性点经低电阻接地原理接线如图 1 所示。图 1 中, C_A 、 C_B 和 C_C 为线路各相对地电容; R_N 为中性点低电阻。本文所述的 10 kV 低电阻接地系统就是 10 kV 配电系统中性点采用低电阻接地。

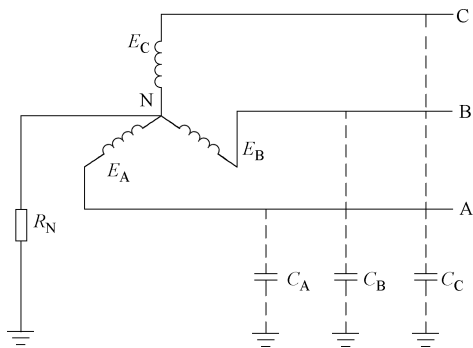


图 1 中性点经低电阻接地原理接线图

Fig. 1 Typical wiring diagram of low-resistance neutral grounding system

改革开放 40 多年来,石油化工企业经历了高速发展,特别是随着企业规模的扩大,用电负荷不断增加,配电电缆长度大幅增长,10 kV 配电系统容量和结构也发生很大变化,尤其是系统电容电流增长较大,导致单相接地故障电流越来越大,原来应用习惯的配电系统中性点接地方式不再适应变化后的大型 10 kV 配电系统的安全可靠运行的要求^[1]。由于低电阻能有效降低 10 kV 配电系统的间歇性电弧接地过电压,并且接地故障定位较容易,能准确、迅速切除故障线路,提高配电系统安全性和可靠性,所以 10 kV 低电阻接地系统被广泛应用,到目前为止,运行一直正常,普遍反映良好。但是由于中性点采用 10 kV 低电阻接地系统后,接地故障电流明显增大(一般大于 100 A),如果对接地故障电流不加以适当的限制,必将造成较大的地电位升高,容易对人身安全、设备绝缘构成威胁,对通信系统信号造成干扰,同时还可能产生供电连续性问题等。所以很有必要结合石油化工企业 10 kV 配电系统特点,综合考虑上述诸多因素的影响或限制,阐释 10 kV 低电阻接地系统在石油化工

企业的适用性。

1 10 kV 配电系统特点

1.1 10 kV 用电负荷概况及供电要求

石油化工企业在生产、加工、处理、转运和贮存过程中,可能发生易燃、易爆危险介质释放,即石油化工企业大部分区域为易燃易爆环境,依据 SH/T 3060—2013《石油化工企业供电系统设计规范》有关用电负荷分级的规定,石油化工企业用电负荷主要为一级、二级,其中 10 kV 用电负荷主要为 10 kV 电动机、10 kV 配电变压器等,而且 10 kV 电动机占多数,特别是大型石油化工企业。每个区域(或联合装置)变电所的 10 kV 配电系统中,10 kV 电动机一般多达几十台,普遍以中小型中压电动机为主。

为保障工艺流程可靠运行,当今的石油化工工艺过程自动控制及设备配置非常完善,其中,一级、二级用电负荷的电动机泵均选用 A/B 两套(即主备各 1 套),要求主备泵电动机的配电电源按双重配置:当运行机泵因故障停机时,根据机泵在工艺过程中的重要性,可选择性选用电气-仪表联锁远方自动控制或机泵旁手动控制,使备用电动机泵能及时起动,确保工艺流程安全稳定运行。

个别不宜全压自起动的大型(一般规定为 5 000 kW 及以上)电动机,如电动气体压缩机组等,由于停机后需要较长时间准备才能再起恢复工作,对企业安全和经济效益影响较大。所以,特别要求这类大型电动机一旦起动运行,不宜随时停机,应尽量保证在有准备或有计划的条件下停机。

对于 10 kV 配电变压器,同样要求设备和电源双重配置。

1.2 10 kV 配电系统网络结构特点

石油化工企业内除总变电站外,至少设置若干座区域(或联合装置)变电所。该变电所属于企业终端 10 kV 变电所,节能原则要求

该变电所尽量深入负荷中心。即在保证安全间距的前提下,尽量布置在生产装置区附近或其中,其主要功能是为其周围的 10 kV 及以下用电负荷配电。

SH/T 3038—2017《石油化工装置电力设计规范》规定:10 kV 配电系统主接线宜采用单母线分段接线,分段断路器设电源自动切换装置,

每组 10 kV 配电母线均要求配置双重电源,馈出配电采用放射式接线,配电系统中性点一般采用不接地、谐振接地或低电阻接地,典型 10 kV 配电系统接线如图 2 所示。图 2 中, Z_N 表示中性点接地装置:当 $Z_N = \infty$ 时,为不接地系统;当 Z_N 为补偿电抗时,为谐振接地系统;当 Z_N 为低电阻时,为低电阻接地系统。

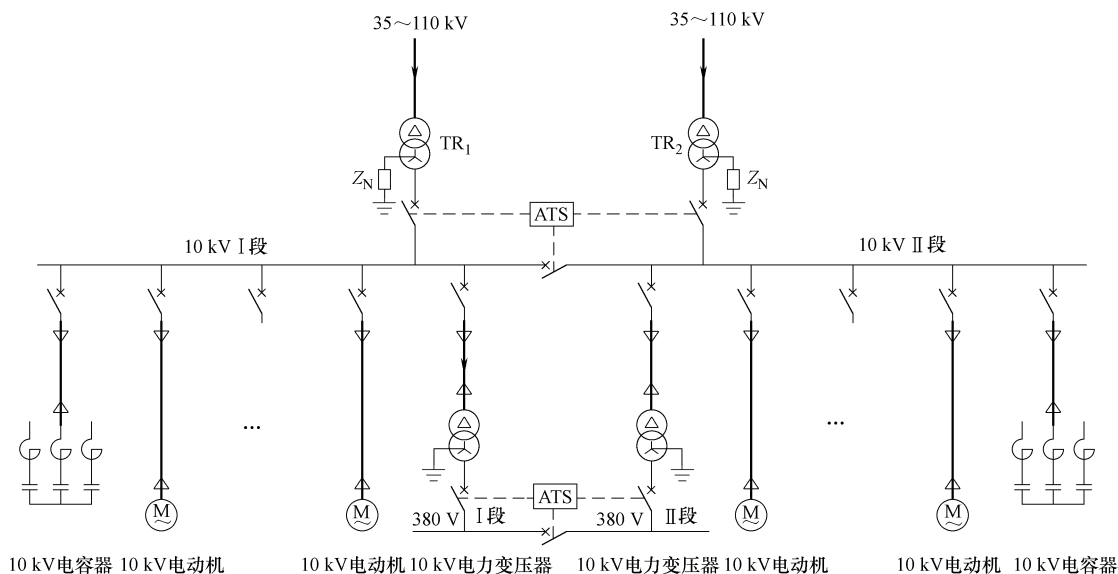


图 2 典型 10 kV 配电系统接线图

Fig. 2 The typical 10 kV power distribution system configuration

个别不宜全压自起动的大型电动机,一般采用电动机-变压器-线路单元接线,其配电系统通常中性点采用不接地方式。

根据联合装置组成、工艺装置规模及用电负荷特点,每座区域(或联合装置)变电所内往往会有多种主接线的 10 kV 配电系统。为叙述方便,本文将主要为大量中小型 10 kV 电动机配电的 10 kV 配电系统简称为大型 10 kV 配电系统,其电容电流通常为 10~30 A;为个别大型 10 kV 电动机配电的 10 kV 配电系统简称为小型 10 kV 配电系统,其电容电流通常小于 5 A。

石油化工企业中,10 kV 配电系统均由电力电缆构成,电缆敷设方式以电缆桥架架空为主,以充砂电缆沟或直接埋地敷设为辅。

1.3 接地网特点

石油化工企业的接地系统主要包括工作接地

(含配电系统中性点接地)、保护接地(含等电位联结)、防雷接地及防静电接地等,这些接地系统共用一个总的接地网,即不同用途和不同额定电压的电气装置或设备共用一个接地网,所有裸露的装置外部可导电部件均接入这个共用接地网,确保等电位联结。接地网主要以水平接地体为主,外沿闭合、内部敷设水平均压带(也称接地干线)的人工接地网,一般要求这个共用接地网的接地电阻不大于 4 Ω 。

2 低电阻额定容量的确定

2.1 低电阻作用机理及最小有效额定容量确定

在 10 kV 电源中性点串联接入低电阻后,该电阻与 10 kV 配电系统对地电容构成并联回路。由于电阻是耗能元件,也是电容电荷释放元件,还

是系统电磁谐振的阻尼元件。当电网发生单相接地故障时,预期间歇性弧光接地过程中的电磁能量可以通过低电阻释放,从而降低电源中性点电位,故障相的恢复电压上升速度也减慢,最终降低了接地电弧重燃的可能性,抑制了预期间歇性接地故障过电压;同时低电阻接地装置的额定发

热电流较大,在 10 kV 配电系统发生单相接地故障时,会产生较大的单相接地故障电流,从而提高了单相接地故障选线的准确性,为准确切除单相接地故障线路提供有利条件。10 kV 配电系统中性点经低电阻接地后,在发生单相接地故障时接地故障电流分布如图 3 所示。

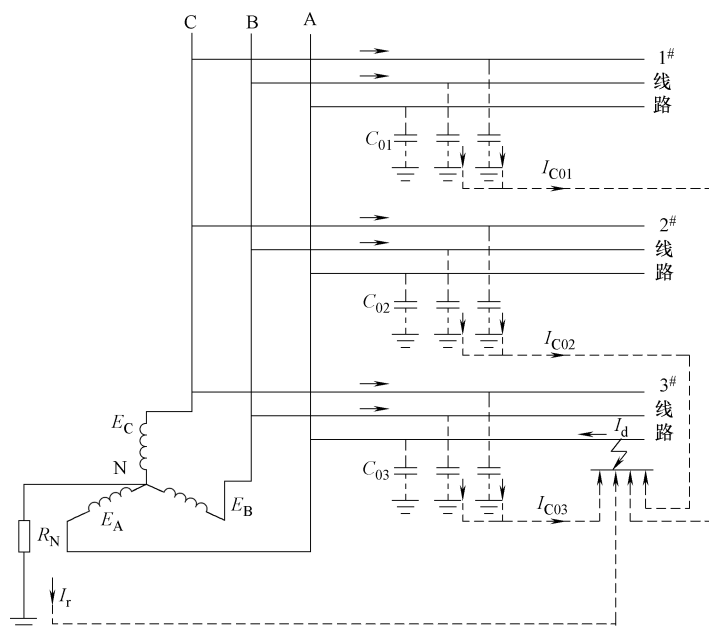


图3 中性点低电阻接地系统单相接地故障电流分布图

Fig. 3 Single-phase grounding current distribution in low-resistance neutral grounding system

低电阻的主要电气参数有额定电压、额定频率、额定发热电流和电阻值等,本文论述中的低电阻额定容量专指低电阻的额定发热电流。为了能获得选择性继电保护所需的足够故障电流,DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐:中性点经低电阻接地配电系统的最小单相接地故障电流值为100 A。虽然低电阻额定电阻值较小(最小也十几欧姆),但是远大于配电线路的阻抗值。当10 kV 配电线路发生单相接地故障时,低电阻两端的电压相当于10 kV 配电系统的相电压,根据DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》的计算方法求得:低电阻额定容量不应低于100 A。

2.2 按过电压保护及绝缘配合原则确定低电阻额定容量

GB/T 755—2019《旋转电机 定额和性能》规定:经过大修的电动机,在清洗和烘干后,应能承受1.5倍额定电压的试验电压(相当于2.6倍相电压);10 kV电动机又是10 kV配电系统中绝缘最薄弱、数量最多的电气设备;DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》明确:在中性点低电阻接地配电系统中,当发生单相间歇性电弧接地故障时,可产生最大过电压不超过2.5倍相电压。所以不超过2.5倍相电压的抑制过电压水准,是衡量低电阻额定容量是否满足过电压保护及绝缘配合原则的基本条件。

从文献[2]的电弧接地过电压试验和模拟分析不难看出：中性点电阻 R_N 的阻值越小，电弧接地过电压越低；随着电阻 R_N 的阻值增大，电弧接地过电压值也逐渐增大；当电阻 R_N 的阻值不大于配电系统容抗时，便开始充分发挥抑制电弧接地过电压到较低水平（即不超过 2.5 倍相电压）。

文献[3]理论分析表明：在中性点低电阻接地系统中，当配电网单相接地故障电流中的有功电流分量（一般取中性点电阻器额定发热电流值）等于配电网总的电容电流值的 1.0 倍时，单相接地故障的非故障相最大过电压幅值就能限制到低于 2.5 倍相电压；当配电网单相接地故障电流中的有功电流分量与配电网总的电容电流值之比等于 1.5 时，单相接地故障的非故障相最大过电压可限制到略低于 2.5 倍相电压；当配电网单相接地故障电流中的有功电流分量与配电网总的电容电流值之比再增大时，单相接地故障的非故障相最大过电压一直保持在略低于 2.5 倍相电压。

DL/T 5153—2014《火力发电厂厂用电设计技术规程》明确建议：低电阻接地方式中，电阻器额定发热电流不应小于配电系统电容电流。

从上述分析可知，单相接地故障电流中的有功电流分量与配电网总的电容电流之比在 1.0~1.5 之间时，就能满足抑制过电压到 2.5 倍相电压及以下的要求。考虑到石油化工企业大型 10 kV 配电系统的通常规模（电容电流一般为 15~30 A）和未来扩容裕量，低电阻器额定容量宜按不低于 2~4 倍工程设计阶段 10 kV 配电系统电容电流取值。

综上所述，石油化工企业 10 kV 低电阻额定容量为 100 A 时，完全满足过电压保护及绝缘配合的要求。

2.3 为确保继电保护可靠性确定低电阻额定容量

上述已明确：在 10 kV 配电线路（或 10 kV

变压器接线端子、10 kV 电动机接线端子）上出现单相接地故障时，低电阻接地装置两端的电压基本维持在 10 kV 配电系统的相电压；如果故障发生在 10 kV 变压器（或电动机）绕组内部，低电阻接地装置两端的电压将小于 10 kV 配电系统的相电压，电压降低的主要原因归于变压器（或电动机）内部绕组阻抗的分压。

对于 10 kV 侧绕组三角形联结的用电设备（如 Dyn11 接线组别的 10 kV 电力变压器），如果在变压器接线端子处发生单相接地故障，则流过保护安装处的接地故障电流基本等于低电阻额定容量；如果在绕组中性点接地，则低电阻两端电压基本为 10 kV 配电系统相电压的 50%，流过保护安装处的接地故障电流也基本等于低电阻额定容量的 50%。

对于 10 kV 侧绕组星形联结的用电设备（如 10 kV 异步电动机），如果在电动机接线端子处发生单相接地故障，则流过保护安装处的接地故障电流基本等于低电阻的额定容量；如果在绕组星形中性点接地，则低电阻两端电压基本为零，流过保护安装处的接地故障电流也为零；当单相接地故障发生在接线端子与中性点之间绕组的任意点时，流过保护安装处的接地故障电流将在低电阻额定容量和零之间变化。

DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》推荐中性点低电阻接地配电系统的最小单相接地故障电流值为 100 A，也就是明确了：只要流过保护安装处的单相接地故障电流不小于 100 A，就能确保单相接地继电保护有选择性可靠动作。依据这个原则可计算出低电阻额定容量与单相接地继电保护有效范围的对应关系，如下表所示。

由上表不难看出：低电阻额定容量越大，配电系统（包括用电设备）的保护范围越大，保护可靠性越高；对于 10 kV 侧绕组星形联结的用电设备，仅靠增大低电阻额定容量不能达到 100% 的保护范围。

表 低电阻额定容量与单相接地继电保护有效范围对应关系

Tab. Ratings low resistance corresponding to the effective range of single-phase ground relay protection

低电阻额定容量/A	单相接地继电保护有效范围	备 注
100	10 kV 配电线路全程	无死区
200	10 kV 配电线路全程+用电设备 100% 的 10 kV 绕组	三角形接线绕组
	10 kV 配电线路全程+用电设备 50% 的 10 kV 绕组	星形接线绕组
300	10 kV 配电线路全程+用电设备 60% 的 10 kV 绕组	星形接线绕组
500	10 kV 配电线路全程+用电设备 80% 的 10 kV 绕组	星形接线绕组
1 000	10 kV 配电线路全程+用电设备 90% 的 10 kV 绕组	星形接线绕组

GB/T 50062—2008《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》和 GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》对于 3 kV 及以上电动机定子绕组单相接地故障有明确规定：当接地故障电流小于 5 A 时，可装设接地检测装置；当接地故障电流大于 5 A 时，应装设有选择性继电保护装置；当接地故障电流大于 10 A 时，继电保护装置应动作于跳闸。换个角度来说，对于绕组星形联结的 10 kV 电动机，可以通过选择性继电保护装置（或接地检测装置）的报警信号来完成有效保护区外的定子绕组接地故障保护。

2.4 为避免转移过电压的危害确定低电阻额定容量

10 kV 配电变压器是连接中低压系统的纽带与桥梁，该变压器的 10 kV 侧，既是 10 kV 电网的负荷侧，又是低压系统的电源侧，因为其外壳的安全保护接地与低压配电系统中性点的工作接地共用同一个接地网，在 10 kV 侧（如其 10 kV 配电电缆）发生单相接地时，10 kV 系统中性点的接地故障电流将在整个配电系统的共用接地网（接地电阻 R_B ）上产生高电位 U_f ，此电位将直接传递到低压侧的中性导体（N）和保护导体（PE）上，给低压用电设备带来过电压威胁，这就是转移过电压的危害。转移过电压传导示意图如图 4 所示。

GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》明确：为确保人身和低压电气装

置的安全，当低压配电系统的接地形式不限，且低压电气装置采用保护总等电位联结系统时，共用接地网地电位升限值为 1 200 V；当低压配电系统的接地形式为 TN 系统，且低压电气装置采用保护总等电位联结系统时，共用接地网地电位升限值为 2 000 V。

电信（或其他弱电）电缆屏蔽层单端接地时，电缆屏蔽层中没有电流流过，发生接地故障时，电缆芯线上磁感应电压很小，远小于电信线路磁感应电压允许限值 650 V^[4]；当电信（或其他弱电）电缆的屏蔽层双端接地时，接地故障电流注入接地网，会有部分电流从电缆的屏蔽层中分流，将在电缆的芯线上感应出较高的磁感应电压。该电位大约为地电位升的 20%，若地电位升为 2 000 V，则电缆的芯线上的磁感应电压为 400 V，该值小于 650 V。所以，地电位升取上限值为 2 000 V 时，也不会影响通信（或其他弱电）线路的正常运行。

根据石油化工企业共用接地网的特点（主要为接地电阻 $R_B \leq 4 \Omega$ ），为确保人身和低压电气装置安全，避免转移过电压对电信线路的干扰，当低压配电系统的接地形式不限，且低压电气装置采用保护总等电位联结系统时，低电阻额定发热电流最大值应取 300 A；当低压配电系统的接地形式为 TN 系统，且低压电气装置采用保护总等电位联结系统时，低电阻额定发热电流最大值应取 500 A。

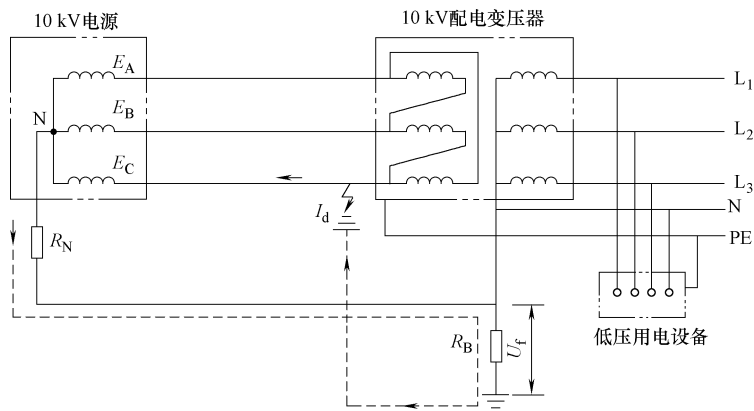


图4 转移过电压传导示意图

Fig. 4 Transfer overvoltage conduction diagram

考虑到石油化工企业主要是10 kV配电系统的实际规模（即系统电容电流最大值不超过30 A）和低压配电系统多种接地方式并存的可能^[5]，低电阻额定发热电流值不宜超过300 A取值。

2.5 目前低电阻额定容量工程设计值的评价

各种中性点接地方式在全球各地配电系统中都有应用，各种文献[1-3]对此已有较多的介绍，各国或同一个国家的不同场所配电系统中性点接地方式都可能不尽相同，主要是根据运行经验和传统做法来确定。如美国IEEE第130号标准中明确规定，将15 kV以下中性点经低电阻接地的单相接地故障电流限制到400 A以下；文献[6]介绍，日本推荐采用不超过200 A的电阻接地方式。

纵观国内外对低电阻接地方式的各种规定规程和长期应用效果，及上述各种因素制约的影响，可以肯定：目前国内大多数石油化工企业大型10 kV配电系统中性点的低电阻额定容量选用200 A是合适的。

3 供电可靠性问题分析

合理的中性点接地方式是确保配电系统安全可靠的一种有效措施，它不仅保障配电系统安全正常运行，在发生单相接地故障时还能

满足选择性和继电保护可靠性，迅速排除故障。

根据GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》的规定，目前石油化工企业10 kV配电系统的中性点接地方式主要有中性点不接地、中性点谐振接地和中性点经低电阻接地。

文献[7]表明：电容电流在5~10 A时，也曾多次发生单相弧光接地过电压情况，造成母线设备对地闪络和相间短路故障；DL/T 5153—2014《火力发电厂厂用电设计技术规程》也明确规定：电容电流在7 A及以下时，采用中性点不接地系统，并动作于信号；再根据目前单相接地故障自动选线应用效果^[8]表明，中性点不接地方式对于配电回路较少的小型10 kV配电系统是安全可靠的。

长期以来的运行经验证明，发生单相接地故障时，不立即跳闸的谐振接地中性点接地方式确实提高了供电连续性，但是这类接地方式主要适用于故障率高、绝缘可自行恢复的以架空线路为主的配电网。对于以电缆为主，特别是具有大量高压电动机的石油化工企业10 kV配电系统，这类接地方式暴露出许多弊端^[9]，不利于企业10 kV配电系统的安全性和可靠性。

低电阻接地能迅速找到接地故障的线路和电气设备，而让非故障的线路和设备继续安全可靠运行，便于迅速处理故障，缩小停电范围，对保证电网安全、可靠运行和提高劳动生产率显然极为有利。

但是，由于中性点采用低电阻接地后，10 kV 配电系统的单相接地故障电流较大（大于 100 A），在这种情况下，就不能还像经消弧线圈接地那样：在单相接地故障发生时还可以继续运行 1~2 h，而是要求立即切除单相接地故障回路。所以，10 kV 配电系统在中性点采用低电阻接地方式后，主要面临的问题是：要正确认识和恰当处理单相接地故障危害，合理利用中性点低电阻作用机理，有效控制单相接地故障电流，将其不良后果降到最低限度，并充分利用各专业有利条件，想方设法满足石油化工企业连续性生产的要求。

用电负荷分级不是按电压等级划分的，或者说在工艺流程中对电动机供电连续性的要求方面，对中、低压电动机是一致的。国家标准^[5]明确规定和目前的实际应用情况，石油化工企业低压配电系统均采用 TN-S 接地方式，而低压配电系统中发生单相接地故障时，故障回路需要立即跳闸（包括电动机配电回路）。从而可知，石油化工企业工艺流程对其中的用电设备（包括 10 kV 高压电动机）偶尔意外停机是具有完善的应对措施（如前述的主备机和联锁控制等）。

4 结束语

根据本文的叙述和分析，可总结出：对于单电源配电系统采用中性点经低电阻接地方式，确实会影响供电可靠性；但对具有双重电源配置的大型 10 kV 配电系统，通过优化配电系统网络结构、充分利用备用设备（或回路）、完善配电系统自动化、优化配电电缆的敷设方式以及提高运行维护能力等，采用中性点经低电阻接地方式，完全符合 GB 50052—

2009《供配电系统设计规范》关于一级、二级用电负荷供电要求的规定，不仅能保障石油化工企业大型 10 kV 配电系统的稳定性和可靠性，也完全满足石油化工企业安全、稳定和连续生产的需求。

参考文献

- [1] 张志昌，等. 10~35 kV 配电网中性点接地方式及改造 [M]. 北京：中国电力出版社，2020.
- [2] 牟龙华，孟庆海. 供配电安全技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2003.
- [3] 李润先. 中压电网系统接地实用技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2002.
- [4] 电力行业规划设计标准技术委员会. 输电线路对电信线路危险和干扰影响防护设计规程：DL/T 5033—2006 [S]. 北京：中国电力出版社，2006.
- [5] 中国工程建设标准化协会化工分会. 爆炸危险环境电力装置设计规范：GB/T 50058—2014 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.
- [6] 要焕年，曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2009.
- [7] 平绍勋，周玉芳. 电力系统中性点接地方式及运行分析 [M]. 北京：中国电力出版社，2010.
- [8] 王清亮. 单相接地故障分析与选线技术 [M]. 北京：中国电力出版社，2013.
- [9] 刘健，等. 配电网单相接地故障处理 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2018.

作者简介



卢丙仕

卢丙仕（1962—），男，高级工程师，主要从事石油化工企业供配电设计工作。

（收稿日期：2021-04-12）