

煤矿井下低压矿用变频器注入式漏电保护的研究

程琦豪, 孙欢笑, 朱 归

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着变频器在井下供电系统中的应用越来越广泛, 变频器对井下供电系统产生的影响也越来越被重视。变频器会给井下供电系统带来多种高次谐波, 使得零序功率方向性原理等原本的漏电保护失效。针对此问题提出了一种注入式井下低压漏电保护方法来进行带有变频器的井下低压供电系统的选线, 并建立带变频器的井下低压供电系统的 MATLAB/Simulink 仿真模型, 通过控制变量的方式, 对供电系统发生单相接地故障的位置以及变频器输出频率进行实验和对比, 分析其对选线的影响, 并验证选线方法的可行性。

关键词: 漏电保护; 变频器; 故障选线; 漏电

Research on leakage protection of low pressure frequency converter in underground coal mine

CHENG Qihao, SUN Huanxiao, ZHU Gui

(China University of Mining and Technology (Beijing) College of Electromechanical and Information Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: With the application of frequency converter in underground power supply system is more and more widely, the influence of frequency converter on underground power supply system is paid more and more attention. Frequency converters will bring a variety of high-order harmonics to the downhole power supply system, making the original leakage protection principles such as zero-sequence power directional principle ineffective. To solve this problem, an injection downhole low-voltage leakage protection method to select the line of downhole low-voltage power supply system with frequency converter is proposed, and establishes the MATLAB/Simulink simulation model of downhole low-voltage power supply system with frequency converter. The location of single-phase grounding fault in power supply system and the output frequency of frequency converter are tested and compared to analyze their influence on line selection and verify the feasibility of line selection method.

Key words: leakage protection; frequency converter; fault line selection; the leakage

0 引言

煤矿产业是我国的传统产业之一, 在我国经济发展中的作用不容忽视, 对安全性的要求也越来越高。煤矿井下工作的安全事故近年来频发,

煤矿井下工作的安全性问题也越来越被人们重视。其中迫切需要解决的问题之一是煤矿井下供电系统的漏电问题。供电的电源、电网以及用电设备是矿井供电系统的主要部分, 电网在其中起

到电力运输和控制通道的作用,而全部接入电网的电气设备统称为用电设备。井下供电系统的稳定性因为受到抽排水体、开采煤炭、疏通瓦斯以及掘进面等多种因素的影响,所以对于煤矿这样巨大的工程来讲是非常重要的。水灾、火灾、瓦斯的爆炸以及人身触电等事故在煤炭生产的过程中稍有不慎就可能发生,这些事故通常会由设备及电网的过载运行、漏电以及断电等供电系统故障所引起^[1]。

变频器是一种高频、高脉冲的电气设备,由于其自身内部复杂的结构以及IGBT等非线性元件的存在,给电网带来大量谐波的同时,很容易对附加直流检测回路造成电磁干扰,干扰采样电压,使得原有的漏电保护装置不能正常工作。变频器产生的高频脉冲与谐波经常导致检漏继电器发生误动作的情况,直接切断线路停机保护,严重时引起变频器频繁断电而造成设备损坏,影响煤炭安全生产与工作效率,甚至危及人身安全^[2]。

目前国内外针对系统可能发生的接地故障提出了许多的选择性漏电保护方法。为了解决单相接地故障出现在小电流接地的供电系统时难以被检验的难题,文献[3]提出了一种新的选线方法,即通过分析特征极性和小波变换系数幅值来进行故障线路的选择。为了处理单相接地故障出现在小电流接地的供电系统时选择灵敏度减小的问题,文献[4]对注入理论进行了发展和延伸,将细微的S注入电流信号通过共振的原理来进行识别。为了处理单相接地故障出现在小电流接地的供电系统时经消弧线圈补偿后的电流更小的问题,文献[5]在经消弧线圈接地原理的基础上进行改进,通过将电阻并联于消弧线圈的方法实现了故障选线和消弧的综合。本文以井下单相接地故障作为参考,提出一种新的故障选线方法,通过仿真分析接地故障位置以及变频器输出频率是否会对选线造成影响,并验证该方法的有效性。

1 注入式漏电保护原理

注入式漏电保护原理示意图如图1所示。图

1中,N为三相不接地系统的中性点; U_a 为A相的线电压; U_b 为B相的线电压; U_c 为C相的线电压; R_1 、 R_2 与 R_3 分别为A相、B相与C相的对地绝缘电阻; C_1 、 C_2 与 C_3 分别为A相、B相与C相的对地绝缘电容; S_k 是三相电抗器; L 是零序电抗器; R 是采样电阻; U_k 是采样电阻上提取的采样电压; U 是用来注入信号的信号源; C_k 是隔直电容。注入的电压信号首先经过采样电阻 R ,然后通过零序电抗器 L ,再经过三相电抗器 S_k 到达三相交流供电系统,最后流经对地绝缘电阻 R_1 、 R_2 与 R_3 以及对地绝缘电容 C_1 、 C_2 与 C_3 进入大地形成回路。其中,隔直电容 C_k 将直流分量断开,防止了直流短路的发生,促进了注入信号回路的形成。三相电抗器和零序电抗器在井下供电系统中主要起两方面的作用:①三相电抗器和零序电抗器的阻抗值随着频率的增大而增大,从而避免50 Hz的工频信号将产生注入信号的信号源 U 损坏;②在供电系统发生漏电时,零序电抗器可以补偿所发生的容性漏电电流,减小了此时人身发生触电的危险性,并且为注入信号的采样提供了充裕的时间。

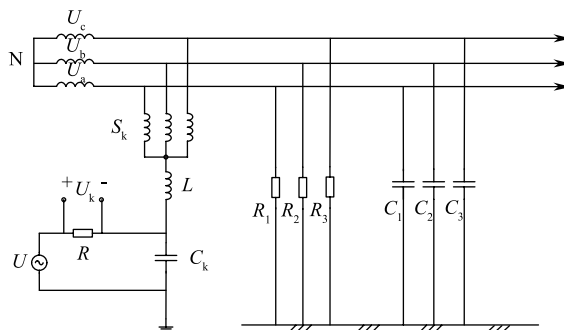


图1 注入式漏电保护原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of injection leakage protection principle

其中,若信号源只是发出普通的常数型直流电压信号,采样电阻上提取的采样电压 U_k 应满足关系

$$U_k = \frac{U}{R + r_e} R \quad (1)$$

式中, U 为注入的直流电压,V; U_k 为采样电压,V; R 为采样电阻, Ω ; r_e 为三相对地绝缘电

阻, $r_e = R_1 // R_2 // R_3$, Ω 。

通过采样电压 U_k 值的大小来推断供电系统的故障情况, 为选线打下良好的基础。

若此时供电系统发生了单相接地故障, 如图2所示。

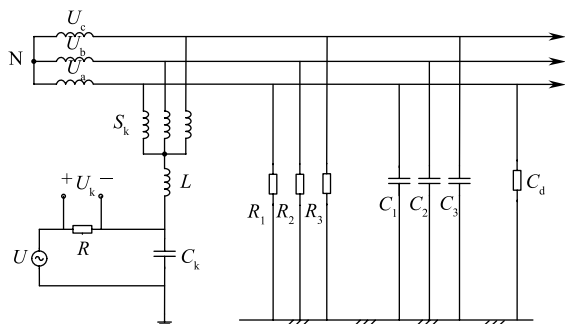


图2 注入式漏电保护单相接地故障示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single phase grounding fault of injection leakage protection

本文所涉及的信号源将注入一种区别于通常数型直流电压信号的带有特定频率和大小的直流方波信号。在数值大小方面, 方波信号的大小会影响到采集电压的准确性, 还可能干扰供电系统的稳定运行。在频率方面, 频率会影响选线的快速性和准确性, 频率的减小还会对供电系统的稳定性造成影响。综合考虑下, 选用频率为5 Hz、幅值为48 V和占空比为1/2的单极性方波电压信号注入。单相接地故障位置处于供电线路的A相, 此时注入直流方波电压信号回路的等效电路示意图如图3所示。

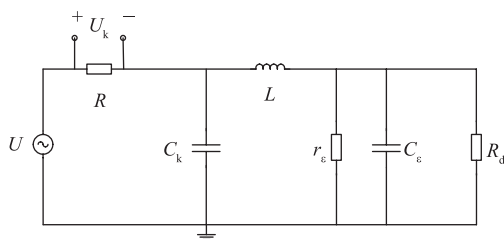


图3 注入直流方波电压信号回路的等效电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent circuit of injected DC square wave voltage signal circuit

图3中, 接地电阻 R_d 并入直流电压信号的直流回路中, 其与三相对地绝缘电阻 r_e 、三相对地绝缘电容 C_e 以及隔直电容 C_k 相并联, 再与采样电

阻 R 串联。其中, 由于注入的方波信号是直流信号, 则信号不会流经三相对地绝缘电容 C_e 以及隔直电容 C_k , 计算采样电压是可以忽略不计的, 故此时采样电压 U_k 应满足

$$U_k = \frac{U/2}{R + R_d // r_e} R \quad (2)$$

式中, $U/2$ 为注入的直流方波电压, V。

与此同时, 当线路对地的绝缘性非常好时, 即 $r_e = R_1 // R_2 // R_3 = \infty$, 可以通过下式计算接地电阻 R_d 的大小

$$R_d = \frac{UR}{2U_k} - R \quad (3)$$

采样电压 U_k 的大小可以反映供电系统是否发生了接地故障, 并且可以通过注入直流方波信号的零序电压与零序电流来进行故障线的选择。

2 附加变频器的影响

2.1 变频器的原理

随着电力电子器件的发展, 变频器的应用范围也越来越广泛。变频器具有多个优点: 首先, 节约能源是变频器最重要的优点, 在风机泵类的应用中表现最为明显; 其次, 变频器可以使用电设备进行软起动, 从而增加设备的运行寿命; 调速也是变频器在应用中的一大特点, 变频器可以控制速度变化, 从而简化控制系统; 最后, 变频器还可以减小机械磨损和损耗, 使整个系统的稳定性得到提高。变频器正朝着网络智能化、专门化以及一体化的方向蓬勃发展。变频器的内部结构示意图如图4所示。

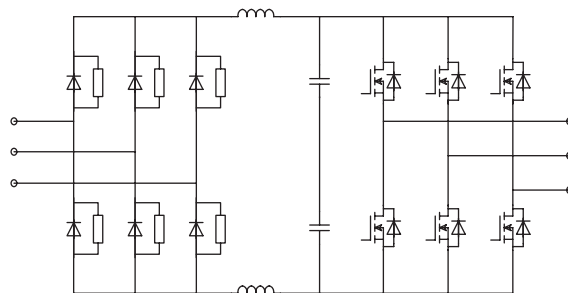


图4 变频器内部结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of internal structure of inverter

变频器的电路由整流部分、中间直流部分、

逆变部分以及控制部分四部分组成。交-直-交的方式是现今变频器采用的主要方式，其工作原理是：先将输入的三相交流信号通过整流部分整流为直流信号；中间直流部分将得到的直流信号进行滤波，并缓冲无功以及储存直流；之后再通过逆变部分将得到的直流信号逆变为三相交流信号；最后控制部分将此三相交流信号的频率、大小都变得可以被调节控制。

2.2 变频器接入系统

带变频器的注入式漏电保护原理示意图如图5所示。

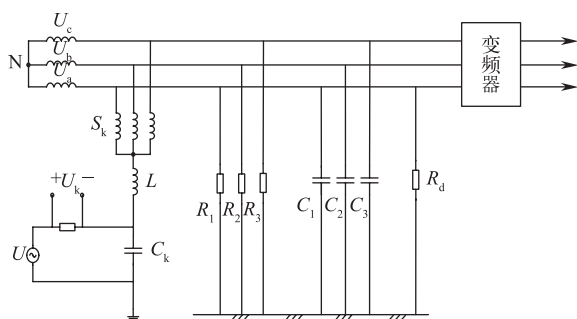


图5 带变频器的注入式漏电保护原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of injection leakage protection with frequency converter

图5中，变频器内部整流器的整流方式为三相二极管整流，逆变器的逆变方式为三相开关管逆变，其中含有大量的诸如二极管、IGBT开关管等非线性电力电子器件，这些元器件在开关以及导通的过程中都会给供电系统带来大量的高次谐波。由于变频器后接电动机主要为三相星形接法的电动机，三相的6k次谐波会自身抵消，剩下的高次谐波以6k+1、6k-1次谐波为主。这些工作中产生的高次谐波使系统的电压变化率过大，从而导致系统的稳定性降低，引发漏电等事故的发生。

2.3 选线方法

由于本文选用频率为5 Hz、幅值为48 V和占空比为1/2的单极性方波电压信号注入，此方波电压信号可以看作双极性方波再叠加一个直流电压信号，其中双极性方波信号可以分解为很多个奇数次和偶数次谐波，故经过FFT计算后，单极性方波可以分解为一个直流量再叠加多个奇数次谐波。

接地故障时注入信号与系统的等效电路如图6所示。

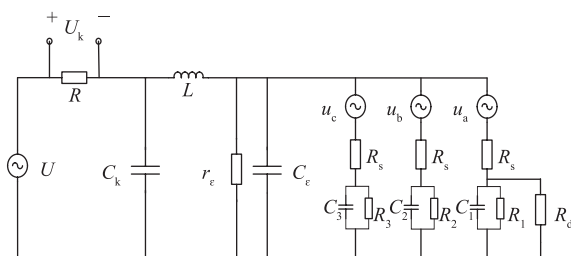


图6 接地故障时注入信号与系统的等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of injected signal and system in case of grounding fault

分别对供电系统只存在对地绝缘电容或者只存在对地绝缘电阻进行分析，得出基波和奇数次谐波只在绝缘电容或只在绝缘电阻上产生电流的比值分别为1:1和2n-1:1，即

$$\begin{cases} \frac{I_{c(1)}}{I_{c(2n-1)}} = 1:1 \\ \frac{I_{r(1)}}{I_{r(2n-1)}} = (2n-1):1 \end{cases} \quad (4)$$

故当发生接地故障时，基波和奇数次谐波作用在阻抗上产生的电流与其在非故障时作用在阻抗上产生的电流将发生变化，电流的比值从1:1变成介于1:1与(2n-1):1之间，即

$$(2n-1):1 > \frac{I_{g(1)}}{I_{g(2n-1)}} \geq \frac{I_{bg(1)}}{I_{bg(2n-1)}} = 1:1 \quad (5)$$

故障线路零序电流基波与2n-1次谐波的比值恒大于非故障线路零序电流基波与2n-1次谐波的比值。

综上所述，将单极性方波电压信号注入到井下供电系统后，可以利用经FFT处理后的直流分量来进行绝缘监测，选择故障线路则通过用FFT变换后基波和奇次谐波在系统中产生的零序电流含量的比值来实现。

3 MATLAB的仿真实验

3.1 搭建仿真模型

搭建带有变频器的井下低压注入式仿真模型，如图7所示。

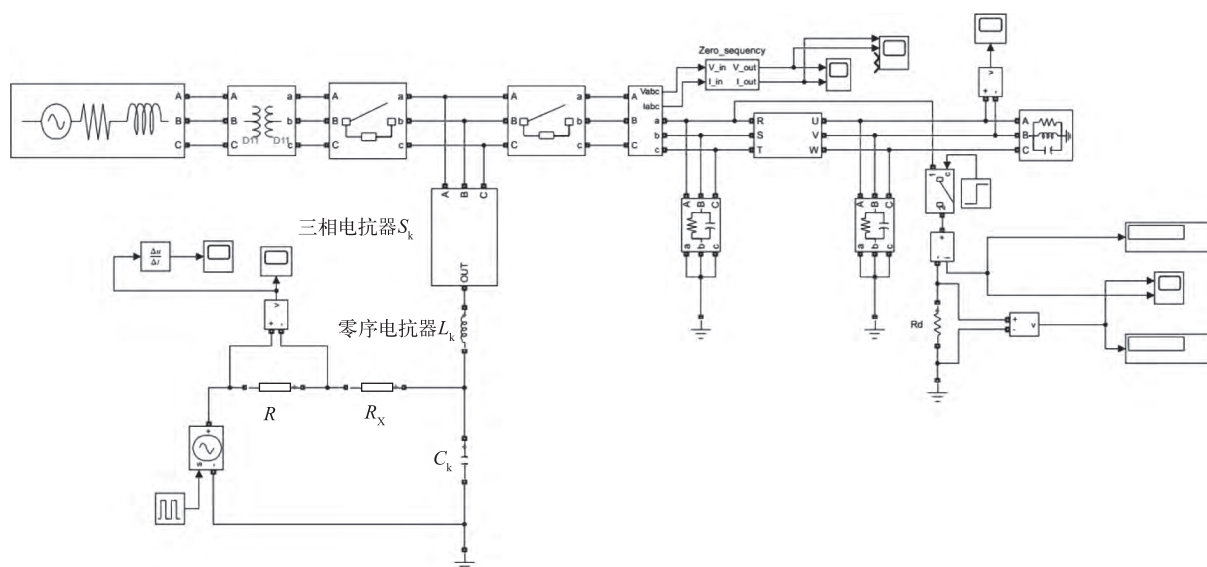


图7 带变频器的井下低压注入式仿真模型图

Fig. 7 Simulation model of downhole low pressure injection with frequency converter

图7中只有一条线路，此线路引入变频器。本文将采用控制变量的方法，通过改变接地故障的位置以及变频器输出侧的频率，分别对此时产生的方波用FFT进行提取和公式计算，分析是否对选线方法造成影响。

3.2 故障位置的影响

一条具有变频器的1 140 V供电线路，向系统注入幅值为48 V、频率为5 Hz的单极性方波，其中采样电阻 $R=50\ \Omega$ ，隔直电容 $C_k=1\ \mu\text{F}$ ，零序电抗器 $L=5.0\ \text{H}$ ，线路所带变频器的输入侧对地分布电容为 $0.3\ \mu\text{F}$ ，输出侧对地分布电容为 $0.03\ \mu\text{F}$ ，变频器此时的载波频率 f 为2 000 Hz，输出频率为50 Hz。

得出数据见下表。

表 单相接地故障位置对选线的影响

Tab. Influence of single-phase grounding fault location on line selection

单相接地故障 的位置	接地电阻大小 /kΩ	基波与三次谐波产生的零序 电流有效值比值	
		发生接地故障 线路	不发生接地 故障线路
变频器输入侧	20	1.324	1.001
变频器输出侧	20	1.345	0.984

由上表可知,不论单相接地故障位置如何变化,接地电阻的大小均采用 $20\text{ k}\Omega$ 。当单相接

地故障位置处于变频器的输入侧时,故障发生后基波与3次谐波产生的零序电流有效值比值为1.324,比值处于 $(2n-1):1$ 与 $1:1$ 之间;当单相接地故障位置处于变频器的输出侧时,故障发生后基波与3次谐波产生的零序电流有效值比值为1.345,比值处于 $(2n-1):1$ 与 $1:1$ 之间;当不发生故障时,基波与3次谐波产生的零序电流有效值比值均接近于1。

故得出结论：单相接地故障位置的变化不会对选线造成影响。

3.3 变频器输出频率的影响

通过改变变频器输出频率得到比值数据折线图如图8所示。

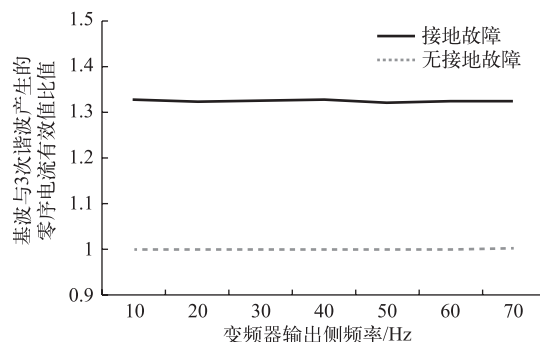


图 8 变频器输出侧频率对选线的影响

Fig. 8 Influence of frequency of output side of frequency converter on line selection

由图8可知,当变频器输出频率从10 Hz依次增大至70 Hz时,发生接地故障的基波与3次谐波产生的零序电流有效值比值一直在1.3~1.4之间,符合比值处于 $(2n-1):1$ 与 $1:1$ 之间的选线判据;不发生接地故障的基波与3次谐波产生的零序电流有效值比值一直接近于1。

故得出结论:变频器输出频率的变化并不会对选线造成影响。

4 结束语

本文以井下漏电保护作为研究对象,研究带变频器是否会对井下低压注入式供电系统造成影响,得出以下结论:

1) 提出了基于井下低压注入式漏电保护新的选线方法,并用理论与公式的推导证明此方法的可行性。

2) 对带变频器的井下供电系统的故障位置变化以及变频器输出频率变化所造成的影响进行研究和分析,并用MATLAB进行仿真验证,得出选线不会受到影响的结论,证明了选线方法的

可靠性。

参考文献

- [1] 高彦.具有变频器的矿井低压漏电保护研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(6):127-132.
- [2] 宋立冬.基于PLM的矿用低压变频器漏电机理的研究[J].中国安全生产科学技术,2016,12(10):130-135.
- [3] 郑尧.基于小波分析的小电流接地系统单相接地故障选线研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.
- [4] 黄坛坛.基于注入原理的小电流接地故障选线技术研究[D].济南:济南大学,2019.
- [5] 唐向峰.基于消弧线圈并联电阻的配电网单相接地故障选线研究[D].郑州:郑州大学,2019.

作者简介

程琦豪(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电气工程。

(收稿日期:2022-09-07)