

井下高压电网单相接地故障选相的研究

武彦军, 张 Jian 权, 黄真奇, 黄智军, 李立晶, 温前飞

(山西汾西矿业(集团)有限责任公司曙光煤矿, 山西 孝义 032300)

摘要: 针对曙光煤矿井下高压供电系统单相漏电故障难以正确选相问题展开研究。分析了系统消弧线圈采用过补偿工作方式的原因, 同时在现有的选线技术基础上, 为了能够快速找到故障线路的故障相, 提出了相序法进行故障选相。结合曙光煤矿供电系统的电气参数, 通过 MATLAB/Simulink 搭建了系统仿真的模型, 仿真结果表明, 此故障选相方法在不同的接地电阻情况下的可行性。

关键词: 单相接地故障; 故障选相; 消弧线圈; 过补偿

Nonlinear speed control for a permanent magnet synchronous generator and the boost-chopper converter

WU Yanjun, ZHANG Jianquan, HUANG Zhenqi, HUANG Zhijun, LI Lijing, WEN Qianfei

(Fenxi Mining (Group) Co., Ltd. Shuguang Coal Mine, Xiaoyi 032300, China)

Abstract: The problem that it is difficult to correctly select the phase for the single-phase leakage fault of the underground high-voltage power supply system in Shuguang Coal Mine is studied. The reason why the arc suppression coil of the system adopts the overcompensation working mode is analyzed. At the same time, in order to quickly find the faulty phase, a phase-sequence method is proposed to solve the problem based on the existing line selection technology. Combining with the parameters of the power supply system of Shuguang Coal Mine, a system simulation model is built through MATLAB/Simulink. The simulation results show that the fault phase selection method is feasible under different grounding resistances.

Key words: single-phase ground fault; fault phase selection; arc suppression coil; overcompensation

0 引言

曙光煤矿高压供电系统由于采用消弧线圈接地方式, 如果线路的某一相发生了单相接地故障, 目前主要靠有经验的操作人员进行故障相的查找, 这种方式成本高、工作量大, 并且耗时较长。随着曙光煤矿开采范围的逐步扩大, 单相漏电故障的选线、选相问题更加复杂, 多年的运行经验表明, 要快速判别煤矿井下高压供电系统故障线路的故障相, 传统的查找故障相方法已经不能满足目前的需求, 故障导致的停电事故会造成煤矿安全生产的重大隐患。因此, 快速并准确找到

故障线路和故障相就显得尤为重要。

本文针对消弧线圈补偿单相接地故障时, 为判断线路故障相, 读取实时采集到的该线路的三相对地电压数据, 通过确定三相线路同一周期下的相位值 ($0^\circ \sim 360^\circ$), 并按照该相位值逆时针的方向对三相线路各个周期的峰值进行排序, 峰值最高线路的下一相即为故障相。

1 消弧线圈采用过补偿的原因分析

如图1所示, 对有 n 条长度不同的线路, 有一条线路 i 的一相发生与大地直接相接, N 点为该系

统的中性点，在中性点 N 处人为接一个纯感性负载 L ，也就是消弧线圈，并将 K 点设为故障相的接地点。

通过分析电路图可知，由于消弧线圈相当于感性负载，当线路的一相发生直接接地故障时，此时在故障线路的接地点 K 处增加了一个感性电流分量，这是由消弧线圈产生的 I_L ，即为消弧线圈的电流，表达式为

$$I_L = \frac{U_0}{j\omega L} \quad (1)$$

此时的故障点流入的总电流 I_K 为

$$I_K = I_\Sigma + I_L = j3\omega U_0 \sum_{n=1, n \neq i}^N C_{0n} + I_L \quad (2)$$

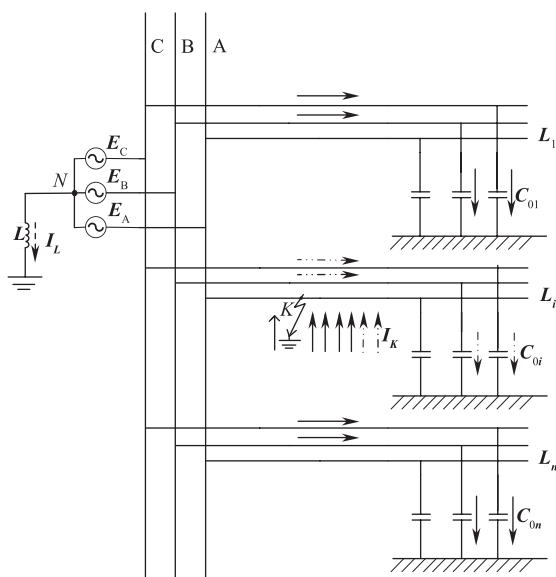


图1 系统原理图

Fig. 1 System schematic

分析故障线路第 i 条线路，在加入消弧线圈之后，流过接地电阻 R_d 的电流要加上消弧线圈所产生的电流，那么此时故障线路 i 上的零序电流补偿后为

$$I_{0i} = -j3\omega U_0 \sum_{n=1, n \neq i}^N C_{0n} - \frac{U_0}{j\omega L} \quad (3)$$

观察式(3)，由于消弧线圈可以视为感性负载，分布电容为容性负载，因此消弧线圈上产生的感性电流可以补偿电容上的容性电流，从而使流过接地电阻的电流减小。

消弧线圈的脱谐度 ν 定义为

$$\nu = \frac{I_\Sigma - I_L}{I_\Sigma} = \frac{3\omega C_\Sigma U_0 - \frac{U_0}{\omega L}}{3\omega C_\Sigma U_0} = 1 - \frac{1}{3\omega^2 C_\Sigma L} \quad (4)$$

应用以上计算公式分析各种补偿状态。在系统中性点处于完全补偿工作状态时，对应的流过电容的电流之和与流过电感的电流关系为 $I_L = I_\Sigma$ ，此时故障电流近似为0，虽然有利于熄灭电弧，但是该种补偿状态可能导致线路发生谐振现象，进一步导致变压器中性点出现过电压，从而影响线路运行和危害设备安全；在系统中性点处于欠补偿工作状态时，对应的流过电容的电流之和与流过电感的电流关系为 $I_L < I_\Sigma$ ，此时脱谐度 $\nu < 0$ ，很明显接地电流仍为容性电流，但是当系统换线或者切除某条线路时，总分布电容减小，可能形成完全补偿状态，同样存在出现谐振过电压的隐患；在系统中性点处于过补偿工作状态时，对应的流过电容的电流之和与流过电感的电流关系为 $I_L > I_\Sigma$ ，此时处于过补偿状态，即脱谐度 $\nu > 0$ ，一般选取脱谐度为3%~10%，故障线路上的对地电容电流不大于该线路上的零序电流，无论分布电容如何减小，都不会造成谐振。

因此，消弧线圈采用过补偿的方式在工程运用中有更好的成效。

2 故障选相

当矿井供电系统发生单相接地故障后，准确识别故障可以对故障线路的查找与检修提供很大的帮助。为了及时对故障线路进行处理，研究煤矿供电系统某一相处于单相接地状态时，快速、准确地找到故障相也具有重要的理论价值和实用意义。

如图2所示， U_A 、 U_B 、 U_C 分别对应着A、B、C相的相电压，每一相相对地绝缘电导为 G ，每一相对地的分布电容均为 C ，中性点 N 通过连接消弧线圈的中性点运行方式，假设以A相为故障相，故障位置的接地电阻为 R_d 。A、B、C三相的相电压分别假设为 U_P 、 $a^2 U_P$ 和 $a U_P$ ， $U_P = U_A$ ，其中 $a = 1 \angle 120^\circ$ 。

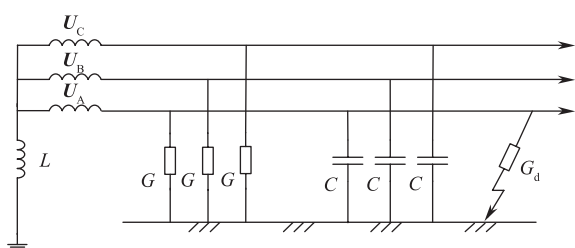


图2 故障原理图
Fig. 2 Fault schematic

系统的戴维南等效电路如图3所示。

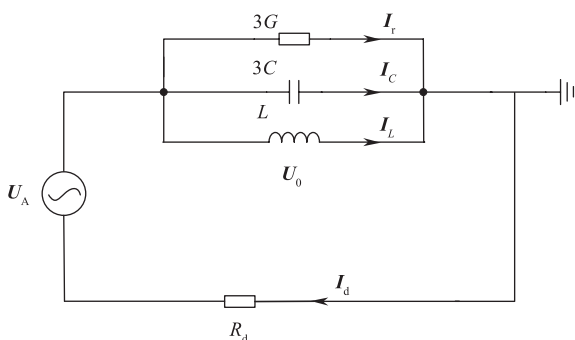


图3 等效电路图
Fig. 3 Equivalent circuit diagram

根据戴维南定理可以得到故障线路零序电压的表达式为

$$U_0 = \frac{-U_p G_d}{(G_d + 3G) + j(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} \quad (5)$$

$$U_0 = -U_p \left[\frac{G_d^2 + 3GG_d - jG_d(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}{(G_d + 3G)^2 + (3\omega C - \frac{1}{\omega L})^2} \right] \quad (6)$$

因此,从式(6)可以看出,零序电压即中性点对地电压随着线路故障点接地电导、漏电导、分布电容以及中性点接地方式的变化而变化。当线路发生故障时,在线路的首端利用装置可以采集零序电压的信息,通过分析采集到的零序电压模值与相位的信息来判断哪一相为故障相。

根据分析,曙光煤矿供电系统现在采用中性点过补偿的运行方式,系统的感抗小于容抗,即 $3\omega C < 1/\omega L$ 。观察式(6), U_0 超前于 $-U_p$ 不大于 90° 的角度。此时过补偿状态的 U_0 超前于 $-U_p$ 一个感性的分子,同理采用相量关系表示如图4

所示。

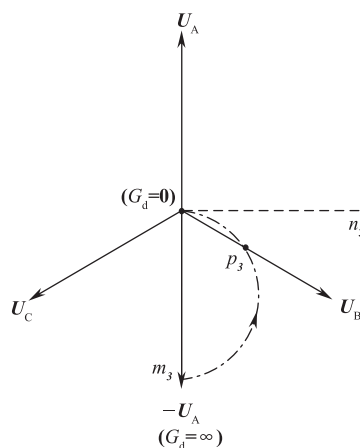


图4 系统过补偿状态时A相发生故障相量关系图
Fig. 4 Phasor relation diagram of fault occurring in phase A when the system is overcompensated

观察图4可以得到以下结论:当接地电导 G_d 从 ∞ 逐渐减小到0时,此时零序电压 U_0 从 $-U_A$ 逐渐减小到0,其变换轨迹对应着虚线 m_3 到虚线 n_3 之间的曲线,且变换的轨迹交于B相电压相量 U_B 的 p_3 点。设 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别是零序电压 U_0 与A相方向相反的电压 $-U_A$ 、B相电压 U_B 、C相电压 U_C 之间的夹角,当零序电压 U_0 在虚线 m_3 到虚线 n_3 之间变化时,可以看出 $\theta_1 \geq 90^\circ$ 、 $\theta_2 \leq 60^\circ$ 和 $\theta_3 \geq 60^\circ$ 。

1) 当 $G_d = \infty$ 时,即为A相发生金属性短路时,此时, $|\angle(U_B - U_0)| = |\angle(U_C - U_0)|$, $|U_0 + U_A| = 0$, $|U_0 + U_C| = |U_0 + U_B|$ 。

2) 当 $G_d = 0$ 时,即A相不发生短路故障时,此时 $U_0 = 0$, $|U_0 + U_C| = |U_0 + U_A| = |U_0 + U_B|$ 。

3) 当 $G_d = \infty \sim 0$ 时,即A相经一定的电阻接地时,此时根据数学中相量的平行四边形法则,由于A、B、C三相的相量模值大小相等,因此 U_A 、 U_B 、 U_C 三个相量当中的任一相量与零序电压 U_0 的夹角越小时,那么这个相量与 U_0 的相量和的模值就越大。

由以上数学理论分析可以总结:A相发生接地故障的结论为 $|U_0 + U_B| \geq \{|U_0 + U_C|, |U_0 + U_A|\}$ 。当B相接地时,接地电导同样在 $\infty \sim 0$ 变化时,同理可以得到B相发生接地故障时的结论为 $|U_0 + U_C| \geq \{|U_0 + U_A|, |U_0 + U_B|\}$ 。当C相接地时,同

理接地电导在 $\infty \sim 0$ 变化,可以得到C相发生接地故障的结论为 $|U_0 + U_A| \geq \{|U_0 + U_B|, |U_0 + U_C|\}$ 。

对于中性点经过消弧线圈接地系统而言,中性点为过补偿的工作状态,此时故障线路的故障相选相方法为:当系统发生一相接地故障后,若通过装置检测到三相当中的某一相相对地电压的有效值最高,则线路故障相*i*就是按照A-C-B-A逆序排列*i*相对应的下一相。

3 仿真实验

为了验证选相方法的可行性,利用MATLAB/Simulink仿真软件搭建了一个6 kV煤矿供电系统,如图5所示。频率为50 Hz,在理想情况下,该供电系统的三相分布电容为5 μF,三相对地电阻均为 $10^8 \Omega$ 。在 $t=0.1$ s时,将A相设置为发生单相接地故障。

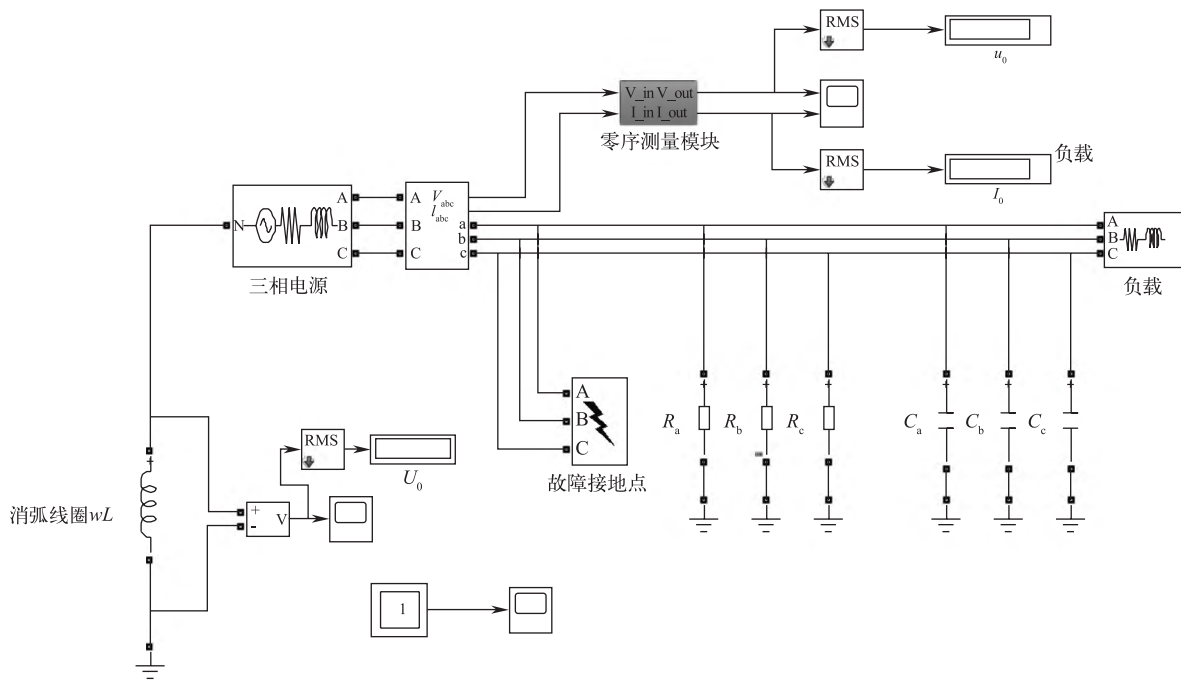


图 5 矿井高压电网故障选相仿真模型

Fig. 5 Simulation model of fault phase selection in mine high voltage power network

对于中性点经过消弧线圈接地系统,设置 $t=0.1$ s时投入消弧线圈,过补偿状态一般取脱谐度为5%, $L=0.643$ 3 H。在 $t=0.01$ s时,A相处于

接地状态,接地电阻取零到 ∞ 之间变化时,对应的三相相对地电压幅值的大小见下表。

表 过补偿工作方式三相对地电压比较

Tab. Overcompensation state three relative ground voltage comparison

接地电阻 / Ω	A 相相对地电压 / V	B 相相对地电压 / V	C 相相对地电压 / V
0	0.000 003 052	5 989	5 990
100	81.26	6 029	5 948
500	403.5	6 160	5 757
10^3	791	6 263	5 478
10^5	3 432	3 715	3 244
10^8	3 458	3 458	3 458

根据仿真数据可知,当接地电阻为0,即接地电导为无穷大时,A相的相对地电压近似为0,而B、C两相的相对地电压相等;当接地电阻为 $10^8 \Omega$ 时,可近似看作接地电阻无穷大,此时A、B、C三相的相对地电压近似相等;当A相发生接地故障且有一定的接地电阻时,观察数据B相的相对地电压最高。因此,对于中性点经过消弧线圈过补偿状态工作方式,当线路发生单相接地故障后,如若检测到 i ($i=A,B,C$)相相对地电压的有效值最高,则线路故障相就是按照A-C-B-A逆序排列 i 相对应的下一相这个判断故障相的方法判断的。

4 结束语

本文解释了系统采用过补偿工作方式的原因,并分析了系统某一相发生了接地故障,在接地电阻从零到无穷之间变化时,通过比较线路各相的相对电压的大小不同来进行故障选相,仿真的结果验证了其可行性。结合现有的选线技术,此选相方法在煤矿实际供电系统得到应用,为实现曙光煤矿井下快速排除故障提供现实可行的方案,并确保曙光煤矿供电系统能够高效稳定运行。

参考文献

- [1] 王彦文. 煤矿供电技术[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2013.
- [2] 王彦文. 快速断电安全技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [3] 徐海瑞, 王力, 赵广立, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 河南电力, 2012(4): 33-33, 66.
- [4] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术, 2004(16): 86-89.
- [5] 赵冉, 谭伟璞, 杨以涵. 配电网中性点接地方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(4): 22-26.
- [6] 李雅靓. 小电流接地系统单相接地故障仿真及其特征分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [7] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.

作者简介

武彦军(1978—), 男, 工程师, 研究方向为煤矿供电系统继电保护。

(收稿日期: 2022-05-19)