

电机驱动用长电缆破坏机理分析及防护

李晓,王隽,屠幼萍

(高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学),北京 102206)

摘要:采用长电缆的电动机驱动系统频繁出现电缆绝缘损坏问题,严重影响了系统的可靠运行。在分析变频谐波和电压闪停对长电缆绝缘影响的基础上,通过PSCAD/EMTDC软件建立了“变频器—长电缆—异步电机”仿真计算模型,进行了变频谐波和电压闪停情况下长电缆的过电压、过电流及相应频谱仿真分析。仿真结果表明:变频器输出脉冲波经长电缆传输时会在电缆接头处产生接近两倍的谐波过电压,同时产生谐波过电流导致电缆绝缘降低;电网电压发生闪停后,电机发生能量倒送,产生短时大电流破坏电缆绝缘。基于仿真结果,设计了一种二阶RLC低通滤波器以抑制变频谐波的危害,并提出了降低电压闪停影响的保护措施,从而有效地保护电缆绝缘。

关键词:PSCAD/EMTDC;长电缆;变频谐波;电压闪停;绝缘;RLC低通滤波器

中图分类号:TM921

文献标识码:A

Analysis and Protection of the Failure Mechanism of Long Cable for Motor Driver

LI Xiao, WANG Cong, TU You-ping

(Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC (North China Electronic Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The motor driving systems using long cable frequently appear cable insulation problems, which seriously influence the reliable operation of the systems. Based on the analysis of the influences of frequency harmonic and voltage transient loss on the long cable insulation, the “converter-long cable-induction motor” simulation model based on PSCAD/EMTDC software was built, the over-voltage, over-current and the corresponding spectrum under the situation of frequency harmonic and voltage transient loss were simulated and analyzed. The results show that the converter output pulse produce nearly twice harmonic over-voltage in cable tapping through long cable, meanwhile produce a certain harmonic over-current, which results in the decrease of cable insulation; the induction motor delivers its energy after happening voltage transient loss, which produce short-term high current that leads to the damage of cable insulation. Based on the simulation results, a kind of second-order RLC low-pass filter was designed to suppress the harm of frequency harmonic, and some protection was put forward to decrease the influence of voltage transient loss, which can effectively protect the cable insulation.

Key words: PSCAD/EMTDC; long cable; variable frequency harmonic; voltage transient loss; insulation; RLC low-pass filter

1 引言

冶金、石油化工、造纸、纺织等行业的电力驱动系统中,某些应用领域由于变频器和感应电动机之间的距离可以达几百甚至上千m,此时必须采用长电缆进行连接。由于长电缆的绝缘故障给整个驱动系统带来的问题越发引起相关行业的关注^[1-3]。具体表现为电动机绕组和电缆

线的绝缘材料迅速老化,造成电动机或电缆的绝缘损伤,甚至出现绝缘击穿,严重时导致电动机烧毁、电缆爆裂。长电缆的绝缘故障会给系统的可靠运行带来极大的威胁,既影响了生产,又增加了维修经费,造成不应有的经济损失。

本文将通过PSCAD/EMTDC仿真软件建立“变频器—长电缆—异步电机”计算模型,仿真分析变频谐波和电压闪停对长电缆绝缘产

作者简介:李晓(1988-),女,硕士研究生,Email:lixiao952788@126.com

生的影响,进而提出一种RLC低通滤波器来消除变频谐波产生的负面效应,并提出降低电压闪停影响的保护措施,最大限度地降低长线电缆的损坏机率,保证电缆及整个驱动系统长期可靠运行。

2 故障原因分析

实际运行中,从电缆的检修原因来看,造成电缆绝缘损坏的因素主要有变频高次谐波和电压闪停^[4-5]。

2.1 变频谐波的影响分析

变频技术的推广应用,一方面使电机调速性能大大提高,拖动控制系统的效率明显提高,另一方面在很多应用系统显著地节约能源,但与此同时变频技术也带来了新的问题^[6-10]。

目前变频器广泛采用的是高频脉冲宽度调整技术(PWM)。随着电力电子器件技术的快速发展,器件的工作频率越来越高,因此PWM变频器的输出电压在很短时间内快速上升、下降,即存在很高的电压变化率。当其用于长距离供电工况时,由于长线电缆存在分布电感和分布电容,当电缆的波阻抗与负载电动机的等效阻抗不匹配时,将产生电压行波反射现象,在电缆中产生高频过电压阻尼振荡,加速了电缆线的绝缘老化,甚至造成电缆的绝缘击穿,严重时会使电缆爆裂。

另一方面,当PWM高频脉冲波在电缆中传输时,将有高频谐波对电缆的外护套进行高频加热,且谐波次数越高,谐波电压、电流放大倍数越大。严重的谐波电压及谐波电流使电缆中产生严重的过电压、过电流现象,电缆严重发热,其绝缘容易老化、击穿。

因此,为了提高电缆绝缘寿命、延长拖动系统检修周期,需要在长线电机拖动系统中加入有效的滤波装置以抑制PWM高频脉冲波对于长线电缆的损害。

2.2 电压闪停的影响分析

变频调速设备对电网供电质量有较高的要求。电压质量的优劣对变频器安全运行有着直接的影响,尤其是外界因素,如雷击、特大负荷投运、开关倒闸操作、架空线或电线短路故障等原因造成的电网瞬时停电,对变频器的正常运行有较大影响。变频器对电压闪变的反应非常灵敏,当瞬间停电超过5个周波(即0.1 s)时,变频器的

晶闸管立即关断,变频器保护停机。变电站一般设计有自动重合闸装置,但是自动重合闸反应时间只能达到2 s,不能解决瞬间停电对变频器造成的影响^[11]。停电后变频器依靠直流电容中储存的能量支撑负载,因此其电压会迅速下降。当电压下降到临界值时,为避免损坏开关元件,必须封锁脉冲输出,使变频器停止工作。

当变频器停止工作后,电动机由于负载惯性大会存在一个较长时间的停车过程,在此期间电动机会发生能量倒送产生瞬间大电流,由于电缆接头部位导体截面突变,电流导通性较差,过电流将造成电缆绝缘的损坏。

3 仿真分析

本文利用PSCAD/EMTDC软件对PWM高频脉冲波和电压闪停对电缆接头处电压电流进行仿真分析。仿真模型见图1,模型中包括三相交流电源、变频器、长线电缆(动力电缆)、引接电缆、三相鼠笼式异步电机。其中逆变器采用6脉波PWM控制,载波频率为3 kHz,基波频率为50 Hz,整流输入侧电压为1.24 kV,驱动的电机电为50 kW,1 kV的三相鼠笼式异步电动机,长线电缆型号为QYEQX6,长度 L 为2 km。

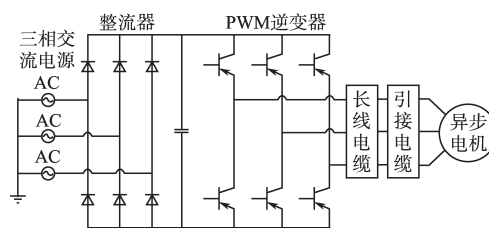


图1 仿真计算模型

Fig.1 The simulation calculation model

基于上述所建仿真模型,仿真计算变频器输出端电压及长线电缆与引接电缆接头处电压,结果如图2、图3所示,相应的频谱分析图如图4和图5所示。

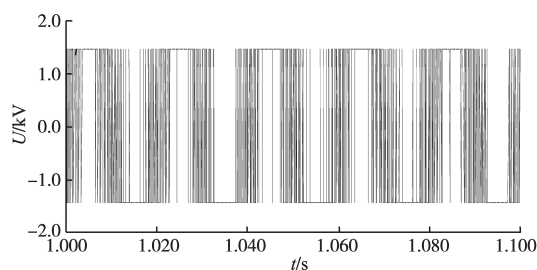


图2 变频器输出端相电压波形

Fig.2 The phase voltage waveform of converter output

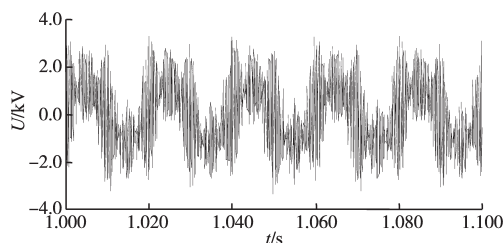


图3 电缆接头处相电压波形

Fig.3 The phase voltage waveform of cable junction

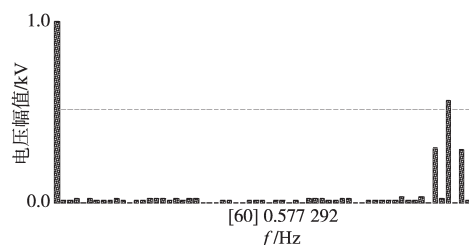


图4 变频器输出端相电压频谱分析图

Fig.4 The phase voltage spectrum analysis diagram of converter output

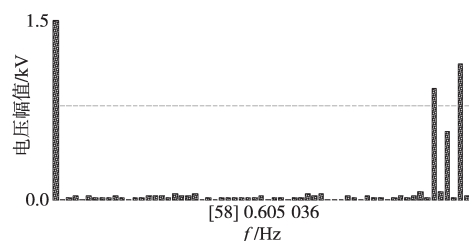


图5 电缆接头处相电压频谱分析图

Fig.5 The phase voltage spectrum analysis diagram of cable junction

图2为变频器输出端电压波形。图3为电缆接头处电压波形。经过对比,可以看出在电缆接头处最大电压可达到2.73 kV,而变频器输出电压为1.45 kV,过电压倍数为1.88倍。图4和图5分别为变频器输出端相电压和电缆接头处相电压的频谱分析图,可看出电缆接头处电压高频分量(载波频率附近)较变频器输出端电压高。

在高频谐波电压作用下,电缆的介质损耗为

$$P_c = 2\pi f U^2 C \tan \delta \quad (1)$$

式中: P_c 为介质损耗值,W; f 为谐波频率,Hz; U 为谐波电压,V; C 为电缆电容,F。

由于谐波的频率很高(高达3 000 Hz),且谐波电压幅值较高,使得电缆的介质损耗较大,温升较高。

图6为电缆接头处相电流波形。图7为相应的频谱分析图。可以看出,电缆接头处存在很大的谐波电流分量,载波频率附近最为明显。谐波

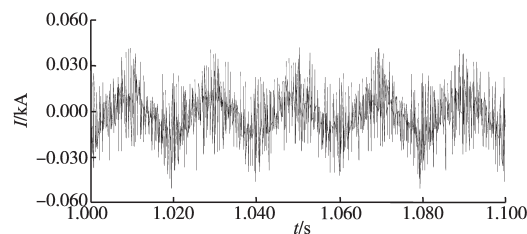


图6 电缆接头处相电流波形

Fig.6 The phase current waveform of cable junction

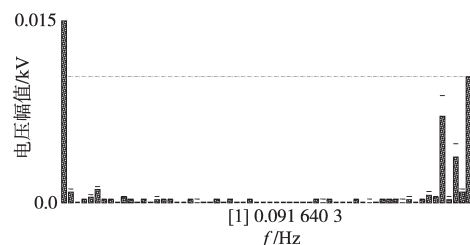


图7 电缆接头处相电流频谱分析图

Fig.7 The phase current spectrum analysis diagram of cable junction

电流流经电缆时引起的附加损耗为

$$P_L = \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 R_h \quad (2)$$

式中: P_L 为附加损耗值,W; I_h 为 h 次谐波电流,A; R_h 为 h 次谐波频率下的电阻, Ω 。

因集肤效应使得 R_h 随频率升高而增加,附加损耗加大,从而使电缆温度升高^[12]。

长期运行过程中,电缆中严重的谐波电压产生很大的介质损耗,谐波电流产生一定的附加损耗,两者的共同作用导致电缆绝缘层发热严重,特别是在电流导通性较差的电缆接头处,从而加速绝缘老化,缩短电缆的使用寿命,严重时还会引起绝缘热击穿或者电缆爆裂。

在仿真系统对变频器整流输入侧电源进行控制,模拟实际电网中电压闪停的情况。实际统计表明发生电压闪停后电动机降速时间一般为3~10 s。故仿真设计电动机降速时间为3 s,电源在 $t=2$ s时发生闪停。电缆接头处相电压和相电流波形如图8和图9所示。

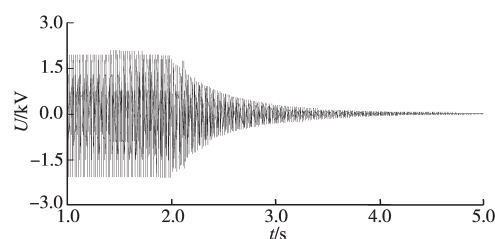


图8 电缆接头处相电压

Fig.8 The phase voltage of cable junction

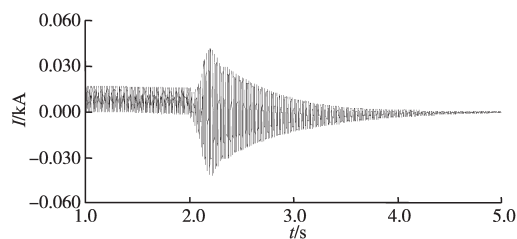


图9 电缆接头处相电流

Fig.9 The phase current of cable junction

由图8和图9可知,当电网电压闪停时,由于变频器直流电容的能量支撑,电缆接头处电压缓慢降低为零。而电流发生突增,电缆接头处电流最大可增至正常运行电流的2.38倍。这是由于电机自由停车过程中,电机转子转速超过了同步转速,这时电机的转差率为负,转子绕组切割旋转磁场的方向与电动机状态时相反,其产生的电磁转矩为阻碍旋转方向的制动转矩。所以电动机实际上处于发电状态,负载的动能被“再生”成为电能,能量回馈至系统中,产生过电流。由于长期高频谐波电压作用下电缆的绝缘电阻值已大大降低,当电压闪停发生时短时大电流将会导致电缆绝缘的破坏,使得电缆绝缘薄弱处—电缆接头处击穿。

4 保护措施

4.1 变频谐波抑制措施

为了抑制PWM变频器通过长电缆传输时产生的高频过电压、过电流,目前普遍采用变频器端输出滤波器,但以往研究提出的滤波器多针对较短电缆(几百m),而对上千m长电缆所适用的滤波器研究较少^[13-14]。基于此,本文设计了在变频器输出端接入一个RLC低通滤波器,抑制电压脉冲频谱中出现显著差异的高频成份,从而达到减小过电压的效果。

RLC低通滤波器接在变频器输出端,其单相等效电路如图10所示。

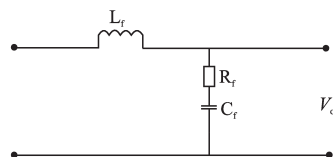


图10 滤波器的单相等效电路

Fig.10 The single-phase equivalent circuit of the filter

下面具体介绍滤波器参数的选取。对于RLC低通滤波器参数的选择,主要考虑以下几个因素:1)截止频率。RLC低通滤波器的截止频率即滤波器的谐振频率。根据截止频率与谐波THD的关

系^[13],选择滤波器的截止频率为800 Hz,可以把输出电压THD控制在5%的范围以内;2)滤波电感。选择滤波电感时要考虑到电感上基波的压降不能超过一定的范围,一般要求电感上的基波压降不能超过3%~5%。并且电感值的选择要使谐波电流的有效值不超过逆变器电流容量的10%~20%^[14],否则,逆变器可能由于谐波电流过大而进入保护状态。综合考虑以上条件取电感值 $L_f=15.25$ mH;3)滤波电容。选择电容值,使空载时流经电容支路的基波电流不超过逆变器电流输出容量的10%。另外,电容和电感值还要受到截止频率的限制。这两个条件决定了电容的取值范围^[14]。综合两个条件,取滤波电容值 $C_f=4.2$ μ F;4)电阻。电阻的取值不宜太大,取值时要考虑到过调制和开关死区的影响,使电容支路的谐振电流限制在允许范围。综合考虑选取电阻值 $R_f=0.02$ Ω 。

仿真结果如图11~图14所示。

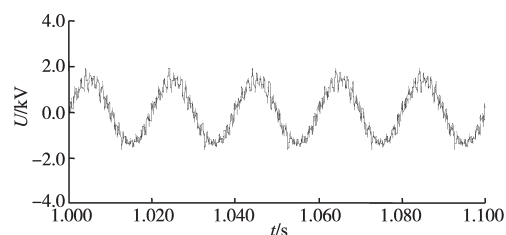


图11 加入滤波器后电缆接头处相电压

Fig.11 The phase voltage of cable junction after adding filter

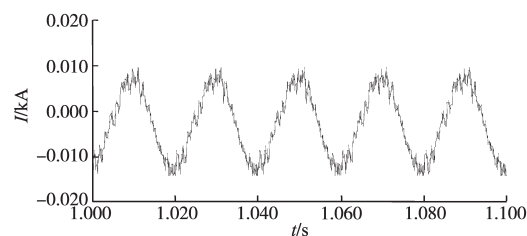


图12 加入滤波器后电缆接头处相电流

Fig.12 The phase current of cable junction after adding filter

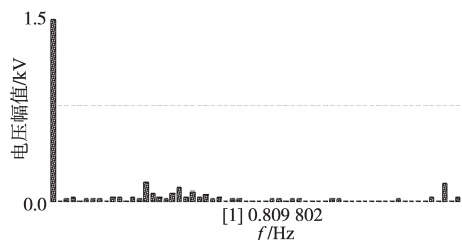


图13 加入滤波器后电缆接头处相电压频谱分析图

Fig.13 The phase voltage spectrum analysis diagram of cable junction after adding filter

图11和图12分别为加入滤波器后电缆接头处的相电压和相电流波形,图13和图14分别为

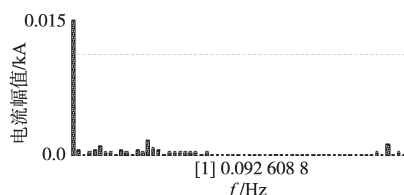


图14 加入滤波器后电缆接头处相电流频谱分析图

Fig.14 The phase current spectrum analysis diagram of cable junction after adding filter

相应的频谱分析图。与图4、图5对比可知,通过在变频器端加入匹配的RLC低通滤波器后,载波频率附近的谐波分量明显衰减,有效地抑制了谐波过电压和电流的产生。

4.2 电压闪停保护措施

由于电压闪停主要是通过影响变频器的输出造成电动机发生能量倒送进而损害电缆的绝缘,解决此类问题的关键在于调整变频器的参数设置或者采用相应保护措施以减小或消除电压闪停对电缆绝缘的影响。可采取以下措施来抑制电压闪停对电缆绝缘的影响。

4.2.1 调节变频器的参数

可以适当改变变频器的允许停电时间,通过延长允许停电时间以使变频器能够躲过短时电源(0.5个周波到3 s)停电,不影响电机系统的运行。对于长时间停电(大于3 s)的情况,可以选择设置变频器中瞬时停电不停机模式,并调节瞬时停电不停机的时间,以调节电动机能够缓慢停止运行,不产生短时能量倒送。

4.2.2 采用功率匹配的UPS供电电源

由于UPS具有“失压”或零切换时间的功能,即电源一旦“失压”或瞬间停电,变频器的进线电源改为UPS供电,电动机继续平稳运行。对于驱动重要敏感设备的中小容量变频器,通过UPS来供电,可以避免因交流电源发生瞬时停电引起变频器跳闸。

4.2.3 配置动态电压补偿装置

它的工作原理是将动态电压补偿装置串接在电源和变频器之间,装置中的电压监测单元一旦检测到电压凹陷,即触发控制内部逆变器,将装置内直流电压逆变成相应幅值和相位的交流电压叠加到电压凹陷的线路上,整个过程约2 ms,使变频器免受电压波动的影响^[15]。

4.2.4 配置两路交流电源

变频器电源分别从2段专用供电母线上接出,且该2段供电母线按互为备用的方式配置。其“常用—备用”互为切换回路必须在变频器“低电压”保护跳闸前将备用电源快速切换上去。

5 结论

本文分析了变频谐波和电压闪停对长线电缆绝缘的不利影响。在变频器输出端采用本文设计的二阶RLC低通滤波器可有效抑制电缆接头处的过电压,消除了高频阻尼振荡现象,从而避免电缆绝缘的快速老化甚至损坏。同时采用优化变频器参数或抑制电压闪停影响的保护措施,能够达到保护长线电缆绝缘的目的。

参考文献

- [1] Culbert I, Lloyd B, Stone G. Stator Insulation Problems Caused by Variable Speed Drives[C]// Europe Conference on PCIC, 2009:187-192.
- [2] 万健如,林志强,禹华军. 电缆长度对PWM逆变器驱动电机端电压的影响[J]. 电力电子技术,2001,35(6):26-29.
- [3] 李岚,刘春玉. 变频供电对电缆绝缘性能影响的研究[J]. 绝缘材料,2009,42(3):36-39,45.
- [4] 鲁娟党,李泽,田姗姗,等. 延长高危潜油泵井检泵周期方法的探讨[J]. 钻采工艺,2012,35(6):45-47,9-10.
- [5] 张椿,戴鹏,宗伟林,等. 长电缆传输脉冲波对电机端过电压影响的研究[J]. 电气传动,2013,43(2):36-39.
- [6] 马文忠,李耀华,孔力. 潜油泵变频驱动负面问题研究[J]. 石油学报,2006,27(2):133-136.
- [7] 冯志华,杨永强,朴庆利,等. 变频器与长电缆相连时电机的失效现象分析[J]. 电气传动,2002,32(5):3-5,17.
- [8] 马洪飞,徐殿国,陈希有,等. PWM逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(11):110-114.
- [9] Ortega R, De Rinaldis A, Spong M, et al. On Compensation of Wave Reflections in Transmission Lines and Applications to the Overvoltage Problem in AC Motor Drives [J]. IEEE Trans. Aut. Cont, 2004, 49(10):1757-1763.
- [10] Basavaraja B, Sarma V S S. Analysis of the Over-voltages in PWM-inverter Fed Induction Motors[C]//IEEE Conference on Asia-Pacific Technology Conference, 2008:1-6.
- [11] 刘图征,邹永胜,姜海斌,等. 电网波动对变频器的影响与对策[J]. 石油工程建设,2006,32(5):78-80,86.
- [12] 翁利民,刘琨,靳建峰. PWM逆变器输出对异步电动机的不利影响及其抑制分析[J]. 电机技术,2006(2):10-13.
- [13] 颜斌,陈希有. 变频器输出RLC正弦波滤波器的工程设计[J]. 电机与控制学报,2002,6(3):256-260.
- [14] 文磊,陆益民. 交流变频调速系统电机端过电压的仿真研究[J]. 湖南工业大学学报,2009,23(3):90-92.
- [15] 赵建中. 350MW机组给煤机变频器电源瞬停时维持连续运行的方法[J]. 中国电力,2010,43(3):51-54.

收稿日期:2013-05-20

修改稿日期:2013-10-12