

# High Frequency High Current Uninterrupted Power Serving De-icing Method

Shuchang Hu, Shuwen Wang\*, Wenchuan Ma

College of engineering, Northeast Agricultural University, Harbin

Email: wswtr@163.com

Received: May 17th, 2011; revised: May 25th, 2011; accepted: Jun. 1st, 2011.

**Abstract:** The de-icing method is given that the high frequency large current flow past transmission lines and extra filtering device forming the circuit. The method ensures to remove ice, at the same time not to affect the continuous supply of power, not to change the power distribution network and not to inject harmonics to the grid. High frequency large current has obvious skin effect and wiring heating power high. The results of simulation and calculation show that it has obvious effect and easily operates.

**Keywords:** High Frequency High Current; Skin Effect; Harmonic Filter; De-icing

## 高频大电流不断电除冰方法

胡书昌, 王树文\*, 马文川

东北农业大学工程学院, 哈尔滨

Email: wswtr@163.com

收稿日期: 2011年5月17日; 修回日期: 2011年5月25日; 录用日期: 2011年6月1日

**摘要:** 为了在除冰的同时, 达到不影响电网连续供电、不改变电网潮流分布、不向电网注入谐波的目标, 提出采用高频大电流通过输电线路与外加滤波装置构成回路的方式除冰的方法。高频大电流的集肤效应明显, 导线发热功率高。计算及仿真结果表明, 提出的除冰方法效果明显, 操作方便。

**关键词:** 高频大电流; 集肤效应; 滤波装置; 除冰

### 1. 引言

架空线路覆冰是电网安全运行的一大威胁, 严重时会引起绝缘子脱落, 导线断线甚至导致杆塔完全倒塌<sup>[1]</sup>。2008年初我国南方发生了严重的雨雪冰冻灾害, 造成重大的经济损失和大面积断电事故。为避免此类事故重演, 国内开始重视输配电线路除冰技术的研究。在各种除冰方式中, 热力融冰技术效果明显, 容易实现, 成为研究的热点方向。目前主要有以下三种:

(1) 短路大电流融冰<sup>[2-5]</sup>: 优点是效果明显, 操作简单。但是需要在原有电网中增加设备, 短路侧加

装开关以实现短路。并且能耗大, 需要断电操作, 影响用户正常用电。(2) 过负荷法<sup>[6]</sup>: 优点是不需要外加设备, 成本低, 不中断供电, 提高了电网供电的可靠性。但是需要多次倒闸, 操作复杂, 容易引起误操作, 改变了电网的潮流分布。并且只适用于部分电网, 无法全面推广。(3) 高频高压除冰: 文献[7]提出基于集肤效应和冰在高频下变为有损电解质的特性进行除冰的方法, 找到了在驻波情况下使两种热效应叠加效果达到最佳的频率 100 kHz。优点是能耗小, 除冰效果明显。但是高频大容量设备造价高, 且开关频率过大使得开关损耗增大。同时高频信号会对周围产生较严重的电磁干扰, 严重时可能影响通信。文献[8]提出了基于高频电流集肤效应的除冰方法。结合串联谐振

\*: 通讯作者。

原理,使得传输功率全部转化为输电线路热损耗,确定了最佳除冰电流频率 1250 Hz。优点是设备造价低,但是拓扑复杂,且需要短路操作,影响正常供电。

综合以上研究成果,本文提出一种基于高频大电流集肤效应并配合滤波装置的除冰方法。实现了不影响电网正常供电,不改变电网潮流分布,不向电网注入谐波的目标。

## 2. 集肤效应及滤波装置基本原理

### 2.1. 集肤效应原理

工程电磁场理论<sup>[9]</sup>指出,当交变电流流过导体时,靠近导体表面的电流密度大,越深入导体内部,电流密度越小,且电流振幅按照指数规律衰减。当频率很高时,电流几乎只在导体表面附近,使得有效导电面积减小,电阻率增大。文献同时指出,导线电阻  $R$  正比于频率的平方根  $\sqrt{f}$ 。文献<sup>[10]</sup>指出集肤效应会导致电阻上升和内感下降。进一步指出,在高频时,  $R_{\text{内}} = R_x$ , 且都与角频率的平方根  $\sqrt{\omega}$  成正比。因此考虑集肤效应后,输电线路的阻抗可表示为:

$$Z_h = \sqrt{h}(R + jX) \quad (1)$$

其中  $h$  表示所加的频率与工频 50 Hz 的比值,  $R + jX$  表示工频下的线路阻抗值。

### 2.2. 滤波装置原理

#### 2.2.1. 并联谐振滤波器

如图 1 所示二端口的等效输入导纳:

$$Y_{(j\omega)} = j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L} = j\omega C - \frac{R}{\left( Z_{(j\omega)} \right)^2} - j \frac{\omega L}{\left( Z_{(j\omega)} \right)^2}$$

并联谐振时有:

$$\omega C - \frac{\omega L}{\left| Z_{(j\omega)} \right|^2} = 0 \text{ 求解可得到以下表达式:}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{CL^2}{L}} \quad (2)$$

通过选择合适的  $L$ 、 $R$ 、 $C$  参数,可使图 1 所示电路对于工频电流相当于开路。对于高频电流,电感电阻支路阻抗很大,电容支路阻抗很小,相当于短路,总的并联阻抗接近于零。

#### 2.2.2. 阻尼滤波器

如图 2 所示,具体公式参考文献<sup>[9]</sup>,这里给出定性分析。对于较低频率的电流,由于电容  $C$  及  $L$ 、 $R$  并联的作用电流被阻断;对于高频电流,通过电容  $C$  和电阻  $R$  对大地构成回路,起到了阻断低频,导通高频的作用。选择合适的  $L$ 、 $R$ 、 $C$  参数,可以使图示电路对于 50 Hz 的工频电流呈现高阻抗,相当于断路。对于施加的高频电流,呈现低阻抗,相当于开路。

并联滤波器作为主要的滤波装置,阻尼滤波器可用于电压等级较低的线路。具体分析见下文。

### 2.3. 高频大电流电源装置原理

采用现代电力电子技术,实现把电网 50 Hz 正弦电流整流成直流稳定的大电流,然后逆变成高频大电流作为电源装置。

#### 2.3.1. 整流装置

在电解电镀等工业中,已经成熟运用了一种低压

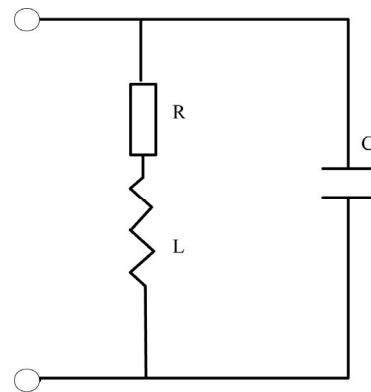


Figure 1. Parallel resonance filter  
图 1. 并联谐振滤波器

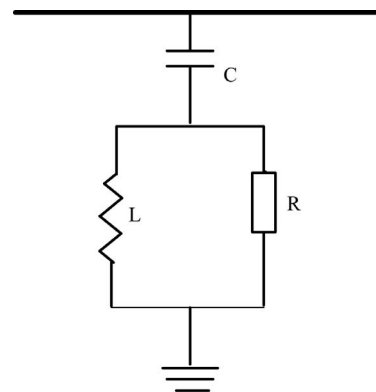


Figure 2. Damping filter  
图 2. 阻尼滤波器

大电流(几十安、几千安)的可调直流电源——带平衡电抗器的双反星形整流电路<sup>[11]</sup>。整流变压器的二次侧每相有两个匝数相同的绕组接成两组三相半波电路。变压器二次侧两绕组的极性相反,可消除铁芯的直流磁化。设置一个电感平衡电抗器,以保证两组三相半波整流电路能同时导电,每组承担一半负载。与普通三相桥式整流电路相比,同等电压下,双反星形电路的整流电压平均值为三相桥式电路的一半,而电流平均值是三相桥式电路的两倍。整流电压与整流电流的波形相同。通过整流装置获得了稳定直流大电流电源。

### 2.3.2. 逆变装置

采用电流型三相桥式逆变电路,每个桥臂一周期内导电 $120^\circ$ ,六个全控开关每隔 $60^\circ$ 依次导通。这样每个时刻上桥臂组的三个臂和下桥臂组的三个臂都各有一个臂导通。环流时,在上桥臂组或下桥臂组内依次环流。这种电路具有以下特点:直流侧串联有大电感,相当于电流源,直流侧无脉动,直流回路呈高阻抗。

将整流装置和逆变装置组合在一起,整流装置为逆变装置提供直流大电流电源,逆变装置作为整流装置的负载。

通过调节整流装置,可以平滑调节输出电流的大小。通过调节逆变装置,可以平滑调节输出电流的频率。为除冰过程的智能控制奠定了硬件上的基础。

## 3. 高频大电流除冰装置应用

### 3.1. 高电压等级线路的应用

高频大电流电源对于电网相当于第二个电源,应用叠加定理<sup>[12]</sup>进行分析。当高频电源单独工作时,经过前面的分析,并联谐振滤波器对于高频电流相当于短路。由电路理论<sup>[13]</sup>可知,三相对称电流流过三相对称负载时有 $\dot{U}_A + \dot{U}_A + \dot{U}_A = 0$ 。可以理解为两侧并联谐振滤波器通过输电线路与三相高频电源构成回路,如图3所示。同时可以看出,在右侧滤波器外侧的负载 $Z$ 中,由于被滤波装置短路,所以不会有高频电流流过。

当电网的工频电源单独工作时,滤波器对工频电流相当于开路。工频电流的流电路径为:输电导线

$R + jX$  和负载 $Z$ 。

运用叠加定理可以看出,除冰装置在除冰的同时,对电网的正常供电不产生影响,且由于集肤效应,输电线路电阻 $R$ 增大,在高频恒定大电流作用下产生热效应明显。反过来看,产生相同的热量所需的电流小。这样不仅节约了能源,又降低了高频大电流电源装置的容量,有效降低了造价。

### 3.2. 谐波的影响

一般来讲,高频大电流电源产生的高频电流中难免会有一些谐波。经过傅里叶级数分解可以得到正序、负序和零序的谐波。正序、负序电流都可以通过图3所示的电路构成回路。而零序电流由于相位相同,不能流过滤器,会对电网和负载产生一定的谐波干扰。在对电能质量要求较高的地方,应该进行滤波。可以通过变压器或阻尼滤波器滤波。

#### 3.2.1. 变压器滤波

将产生的高频大电流通过特殊变压器<sup>[9]</sup>间接向输电线路供电。将变压器一次侧采用三角形连接,可以有效隔断零序3倍频谐波电流通过,保护了变压器两边的设备。

#### 3.2.2. 阻尼滤波器滤波

在电压等级不太高的输电线路,用阻尼滤波器代替并联谐振滤波器。由前面分析可知,零序电流与正序、负序电流一样,都为高频电流,可经过阻尼滤波器直接流入大地。在参数选择合理情况下不存在零序电流流入电网和负载,也就不会产生谐波污染。

### 3.3. 除冰设备的基本模式

基于以上电路,可以设计成两种基本模式的除冰电路。一种为固定型,一种为机动型。

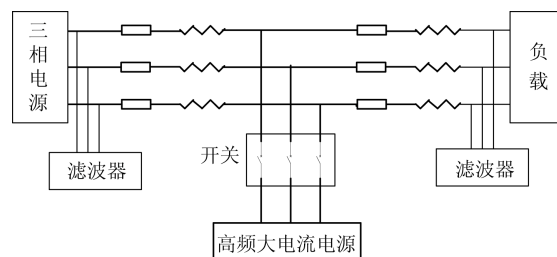


Figure 3. Fundamental figure  
图3. 原理图

固定型装置适用于冰灾多发地区的长距离输电线路。在输电线路中间设立一个融冰站，用于安放高频大电流电源装置。线路两端分别配备一组滤波装置。这种类型的电源容量大，可有效融化大面积的线路覆冰。

机动型设备适用于突发性冰灾。所谓机动型就是基于同样原理的容量相对较小的高频大电流装置，和两组滤波装置。设计成便于安装、便于拆卸、便于运输的形式。当某一地区突发小范围覆冰时，可灵活调派，迅速除冰。

## 4. 实际计算

### 4.1. 频率的确定

根据欧姆定律，相同电流下单位时间内发出的焦耳热与电阻成正比。由于集肤效应，电阻与频率的平方根成正比，由此得到图 4。如图所示，在电流一定的情况下，频率越高热量越大。但同时，设备造价越高，损耗越大。所以在明显存在集肤效应的前提下，应该尽可能的减小频率。可以看出频率在 3~7 kHz 时，曲线斜率明显下降，发热量的增量随着频率的增加逐渐减小。所以综合考虑，建议取 5~7 kHz，这里取 5 kHz。

### 4.2. 仿真结果

使用 Matlab7.0 对整个电路进行仿真，由于 Simulink

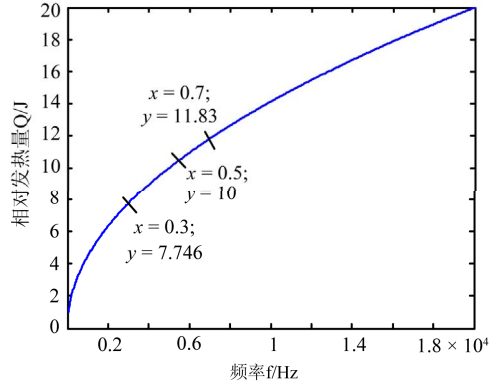


Figure 4. The relation of frequency and calory  
图 4. 频率与发热量的关系

工具箱中没有随频率变化的电抗原件，所以在仿真过程中对电网电源和高频电源分别仿真。仿真模型如图 5 所示：

设置仿真参数，输电线路为 LJG - 240/100，线路总长 100 km，单位工频电抗  $R + jX$  为  $0.665 + j9.9 \Omega/\text{km}$ 。根据公式(1)可以算出 5 kHz 下线路长度的一半对应的电阻和电感： $R = 66.5\Omega$ ， $L = 6.3 \text{ mH}$ 。电网电源参数：线电压 33 kV，频率 50 Hz，Yg 型连接。滤波器参数：无功功率 50 kvar，转折频率 5 kHz，品质因数  $Q = 3$ 。

#### 4.2.1. 高频电源单独供电

统计仿真结果如表 1 和图 6 所示。

#### 4.2.2 电网正常工作

统计仿真结果如表 2 和图 7 所示。

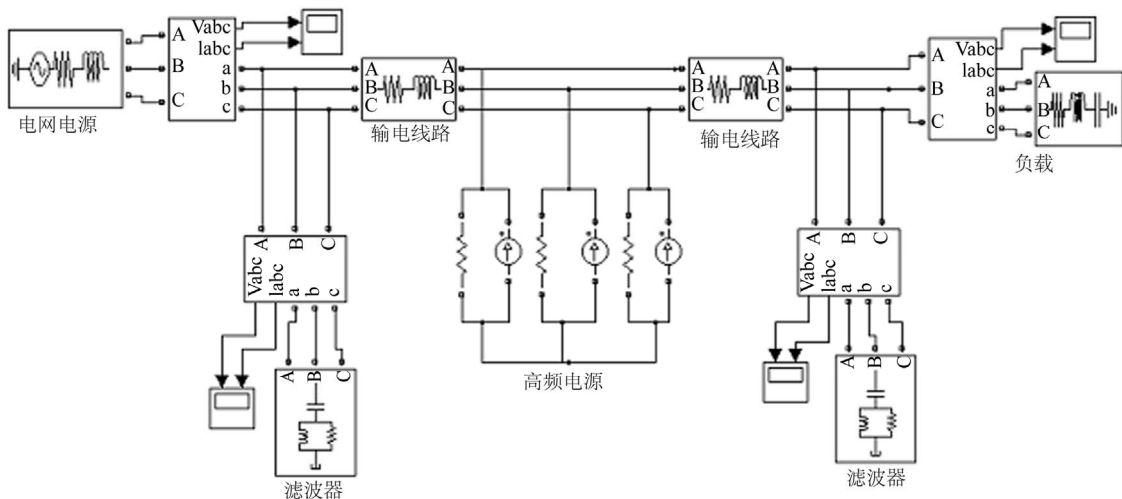
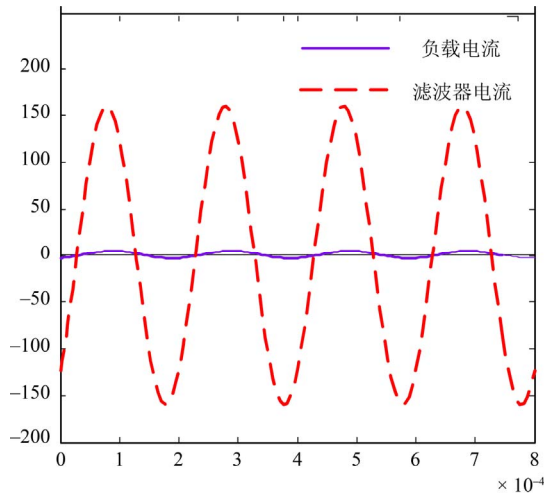


Figure 5. Simulated model  
图 5. 仿真模型

**Table 1. High frequency source simply**  
**表 1. 高频电源单独作用**

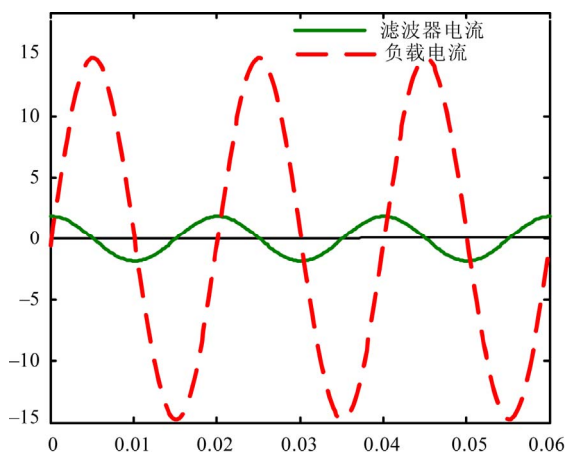
电流的位置	电流最大值/A
左侧滤波器电流	163.5
右侧滤波器电流	160
负载电流	4



**Figure 6. High frequency source simply**  
**图 6. 高频电源单独作用**

**Table 2. Grid source simply**  
**表 2. 电网电源单独作用**

电流的位置	电流最大值/A
电源发出的电流	15.13
左侧滤波器电流	1.86
右侧滤波器电流	1.84



**Figure 7. Grid source simply**  
**图 7. 电网电源单独作用**

**Table 3. Melting ice current**  
**表 3. 除冰电流**

导线型号	雨淞		混合淞	
	50 Hz	5 kHz	50 Hz	5 kHz
LGJ-70/10	137.6	43.5	162.3	51.3
LGJ-120/20	214.1	67.7	221.4	70.0
LGJ-240/30	380.2	120.2	407.5	128.9
LGJ-400/50	486.8	153.9	532.8	168.5
LGJ-500/65	522.5	165.2	596	188.5

从以上结果可以看出：高频电流主要从滤波器中构成回路，工频电流主要流经负载。仿真结果基本证明了高频不断电除冰方法的可行性。

### 4.3. 实例计算

取文献[14]中的数据作为参考，算出常用钢芯铝绞线典型覆冰条件下的融冰电流。根据(1)式，可以算出 5 kHz 时的融冰电流，与 50 Hz 时进行比较，作出表 3。

从表 3 中可以明显看出，高频与工频相比，融冰电流大为减小，降低了高频电源的造价。

## 5. 总结

(1) 采用高频大电流融冰，确定了 5 kHz 的理想频率，输电线路的集肤效应明显，除冰效果好。

(2) 将滤波器作为高频电流的通路，起到了通高频，阻工频的作用。

(3) 实现了除冰过程中不断电，不改变输电线路的潮流分布，谐波注入量小的目标。

## 参考文献 (References)

- [1] 蒋兴良, 易慧. 输电线路覆冰及其防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 2-9.
- [2] 谢彬, 洪文国, 熊志荣等. 500 KV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 180-185.
- [3] 贵阳供电局. 关于架空线路大电流融冰的研究[J]. 贵州电力技术, 2008, 增刊 I: 214-216.
- [4] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.
- [5] 邓健, 肖顺良, 姚璞等. 220 kV 线路融冰方案的改进[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29-30.
- [6] 贵州电力研究院, 吴湘黔, 罗洪等. 220 KV 洪站 I 线路带负荷融冰情况分析报告[J]. 贵州电力技术, 2008, 增刊 I: 207-209.

- [7] 李宁, 周羽生. 应用有限元法分析覆冰输电线路高频电源除冰方法[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 107-109.
- [8] 倪喜军, 赵剑锋, 杨铭等. 基于高频谐振集肤电流法的线路除冰研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 6-9.
- [9] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 189-200.
- [10] George J. Wakileh 著, 徐证译. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 87-90, 101-109, 124.
- [11] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 73-76, 140-145.
- [12] 张德修. 多个不同频率的正弦交流电源共同作用下交流电路叠加定理的证明[J]. 四川教育学院学报, 1995, 11(1): 88-96.
- [13] 邱关源. 电路(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 48-250.
- [14] 蒋兴良, 林锐, 张志劲等. 覆冰交流输电线路保线电流及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 21-33.