

雷电电流的频谱和能量分析

程锐¹ 李梅² 张新燕¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆维吾尔自治区计量测试研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:为了研究风电场中强大电磁干扰源雷电流的基本特性,利用脉冲函数作为 $2.6/50\ \mu\text{s}$ 雷电流的解析表达式,将其与双指数函数表示的雷电电流进行比较说明其可用性。之后采用傅里叶变换和仿真计算的方法对雷电流的幅频特性以及所含能量进行了研究,得到相应的频谱图和能量分布图。经过分析得到的结论是:雷电流的频率在低频范围之内,能量主要集中在 $1\sim 10\ \text{kHz}$ 之间,且雷电流脉冲上升越陡频率分量的初始振幅值越小,但是其包含的高频分量却越多。

关键词:雷电电流;脉冲函数;频谱;能量分布

Abstract: The characteristics of the powerful EMI source - lightning current are mainly studied. Firstly, the pulse function is used as the analytical expression of the $2.6/50\ \mu\text{s}$ lightning current, and then this expression is compared with the lightning current expressed by double-exponential function for explaining its usability. Secondly, the Fourier transform and simulation are adopted to research the amplitude-frequency characteristic and the energy content of lightning current, and the relevant spectrum diagram and the energy distribution are obtained. Finally, through the analysis, the conclusion is gotten that the frequency of lightning current belongs to the low frequency rang and its energy mainly concentrates between $1\sim 10\ \text{kHz}$. If the pulse of lightning current arises faster, the amplitude of frequency component will be smaller, but the more high-frequency components are contained.

Key words: lightning current; impulse function; spectrum; energy distribution

中图分类号:TM863 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0004-03

0 前言

雷电是自然界中雷云之间或是雷云与大地之间的一种放电现象,其特点是电压很高、上升时间很短、具有很大的危害性。无论是直击雷还是感应雷都会对周边设备产生很强的电磁干扰,从而带来巨大的破坏和损失。当代对风能的开发利用不断增加,风力发电机的安装数量也越来越多。随着风电机组单机容量的增大,风电机组为捕获更多的风能,风轮直径不断增大,机组离地高度不断增高,再加上风电机组一般安装在开阔地带或者山顶,其遭受雷击机率也越来越大。并且由于雷电现象的随机性,无论采取何种措施,也不能完全避免雷击的可能,因此风电机组的防雷措施日益受到重视^[1-2]。鉴于

此,就需要对雷电这个强大干扰源进行分析,对其波形参数的确定、频谱和能量分布进行仿真分析确定其研究范围。

1 雷电电流的脉冲函数表示

大量的实测结果表明,雷电流的波形大致呈现出单极性的脉冲形状,正(负)极性雷电放电产生的雷电流具有正(负)极性脉冲波形。为了计算应用方便,在防雷计算中,需要将雷电流波形等值为典型化的可用解析式表达的波形。目前,国际上常用的雷电流等值波形有双指数函数模型^[3]和Heidler函数模型^[4]。但是双指数函数在 $t=0$ 时导数最大,与实际情况中电流波形在 $t=0$ 时导数为0特征不相符,不适用于电磁场计算,而Heidler函数是不可积函数,没有明确的时间积分式,因此也不便于直接用它来进行雷电电磁场的数值计算,故最近有文献提出用脉冲函数表示雷电流的模型能克服以上缺

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51010105064);新疆自治区科技厅自然科学基金项目(2011211A012);新疆大学博士基金项目(BS100122)

点,并且能大大减小雷电电磁场的计算工作量,有助于更加方便有效地进行雷电电磁场的分析与研究。其表达式如式(1)^[5]。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{I_0}{\xi} [1 - e^{(-t/\tau_1)}]^n e^{(-t/\tau_2)}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,峰值修正因子 $\xi = (1 - e^{-n}) e^{n\tau_1/\tau_2}$, $n = \tau_1 / (\tau_1 + n\tau_2)$;脉冲函数中的 τ_1, τ_2 相对于双指数函数中的关系有 $\alpha = 1/\tau_2, \beta = 1/\tau_1$,因此可以借助双指数函数的 α 和 β 进行取值。

以国际大电网会议(CIGRE)提出的大量实测数据为基础,国际电工委员会(IEC)在其标准《雷电电磁脉冲的防护》(IEC-61312-1)中较为系统地推算出各种雷电流的参量指标,其中用波头时间和半幅值时间来描述不同的雷电流波形。由于以上两者的不同分别反映了上升段和下降段的陡度不同,因此不同雷电流波形的应用场合也不同,其中常用的雷电流波形有以下4种^[6],如表1所示。

表1 4种常用雷电流波形适用场合

雷电流波形	适用场合
10/350 μ s	该波形表示回击的短脉冲雷电流,主要用于对地面设施的直接雷击防护,也用于一些雷电电涌保护器的试验检测。
0.25/100 μ s	该波形表示后续回击的短脉冲雷电流,运用于涉及雷电流变化率的防护设计场合。
8/20 μ s	主要是一种冲击电流波形,广泛应用于各种雷电电涌保护器的性能测试。
2.6/50 μ s	中国电力行业规定采用的雷电流波形,应用于输电线路和发、变电站的防雷设计。

基于双指数函数形式用 Matlab 对以上4种波形进行仿真如图1所示。

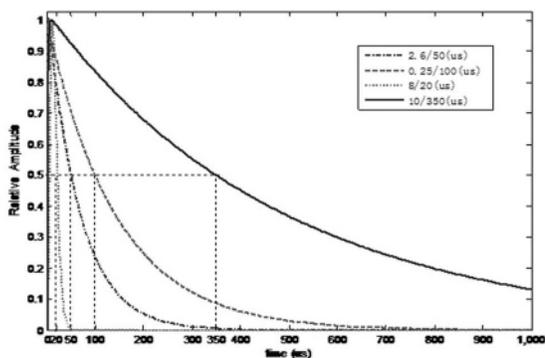


图1 基于双指数函数形式的4种雷电流波形

鉴于研究雷电对风力发电机的影响采取2.6/50 μ s的波形为例,运用脉冲函数将其表示出,并对其频谱和能量分布进行仿真分析。取 $n = 2$ 得脉冲

函数表达式如式(2)。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1.087I_0(1 - e^{-1.86 \times 10^6 t})^2 e^{-1.5 \times 10^4 t}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

用 Matlab 对其与双指数函数形式的雷电流波形进行计算仿真做比较,如图2所示。

由图1、2可见,脉冲函数表示的波形较之双指数形式的波形在峰值时略微有点偏高,但是其上升段和下降段的陡度是一致的,这是因为脉冲函数展开式的第一项是决定函数衰减的主要项,而后面的项决定上升波形,与双指数函数相比,脉冲函数的指数比其略大,故仿真时波峰略高。该波形下降达到半幅值时间也在50 μ s,该时间反映了雷电流下降速度的快慢和电流脉冲持续时间的长短,因此两者图形是基本一致的,都能够反映出雷电流脉冲的性质。

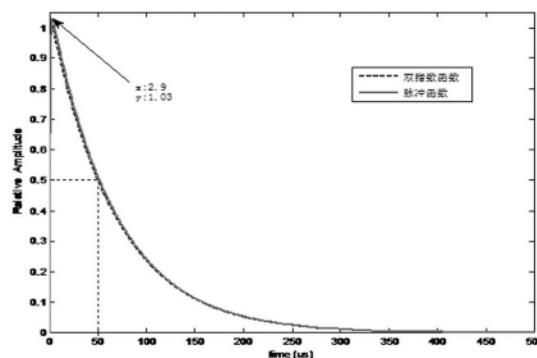


图2 双指数和脉冲函数形式的雷电流波形比较图

2 雷电流的频率分析

首先,对雷电流脉冲函数进行傅里叶变换可得出雷电流的频谱函数,令 $\alpha = 1/\tau_1, \beta = 1/\tau_2$,则

$$I(\omega) = 1.087I_0 \int_{-\infty}^{\infty} [(1 - 2e^{-\alpha t} + e^{-2\alpha t}) e^{-\beta t}] e^{-j\omega t} dt \\ = 1.087I_0 \left(\frac{1}{\beta + j\omega} - \frac{2}{\alpha + \beta + j\omega} + \frac{1}{2\alpha + \beta + j\omega} \right) \quad (3)$$

令其雷电流的振幅频谱为 $Y(\omega)$,则有

$$Y(\omega) = |I(\omega)| \\ = \frac{2.174\alpha^2 I_0}{\sqrt{(2\alpha^2\beta + 3\alpha\beta^2 - 3\alpha\omega^2 - 3\beta\omega^2)^2 + (6\alpha\beta\omega + 3\beta^2\omega + 2\alpha^2\omega - \omega^3)^2}} \quad (4)$$

将给定的 α 和 β 的值代入式(4)中可得到雷电流各频率分量相对应雷电流峰值,如表2。

用 Matlab 对其进行仿真得到振幅频谱,如图3所示。

由表2和图3可知,雷电流的频谱0~15 kHz

时振幅很大且变化也很快 ,并且其主要频率分量主要集中在 0 ~ 30 kHz。

表 2 2.6/50 μs 雷电波频率分量振幅值

角频率 ω/H ₂	频率 f/kHz	振幅 Y(ω) × 10 ⁻⁶ I ₀
0	0	71.6
62 800	10	16.62
94 200	15	11.24
188 400	30	5.647
376 800	60	2.778
628 000	100	1.599
1 256 000	200	0.6733
3 140 000	500	0.1342

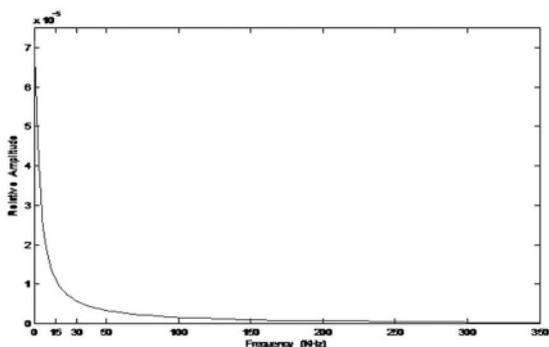


图 3 2.6/50 μs 雷电波振幅频谱图

其次 ,对 2.6/50 μs 雷电波和 10/350 μs 雷电波进行快速傅里叶变换 ,画出两者的频谱图进行对比 ,如图 4 所示。

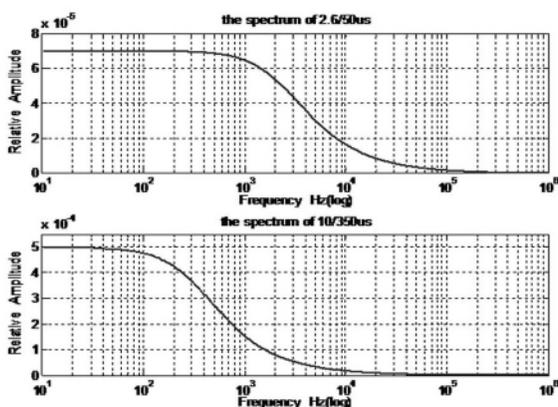


图 4 2.6/50 μs 和 10/350 μs 雷电波频谱图

由图 4 比较可知 ,上升时间快的比上升时间慢的雷电流的幅值相差一个数量级之多。并且 10/350 μs 雷电波在频率 100 Hz 的时候 ,谱线开始下降 ,到频率 40 kHz 的时候幅值基本为零 ;而 2.6/50 μs 的雷电流在频率为 1 kHz 的时候 ,谱线开始下降 ,到 150 kHz 时幅值才趋近于零。因此可以知道 ,脉冲上升越陡 ,所含高频分量越丰富。

3 雷电波的能量分布

由式(3)得到的雷电流振幅频谱函数 ,得到其

能量函数为

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} [u(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |I(\omega)|^2 d\omega$$

$$= 9 \times 10^{24} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(1.05 \times 10^{17} - 5.63 \times 10^6 \omega^2)^2 + (7.08 \times 10^{12} - \omega^2)^2 \omega^2} d\omega \quad (5)$$

用 Matlab 对其角频率的整数倍进行计算得到雷电波能量波形如图 5 所示。

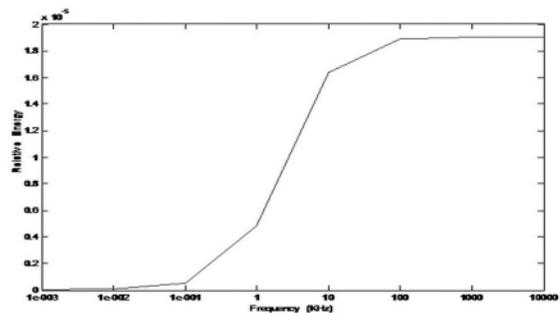


图 5 雷电波能量波形图

为了能够更加清晰地认识到各频段内能量的分布 ,用 Matlab 计算出各频率段的能量占总能量的百分比 ,如图 6 所示。

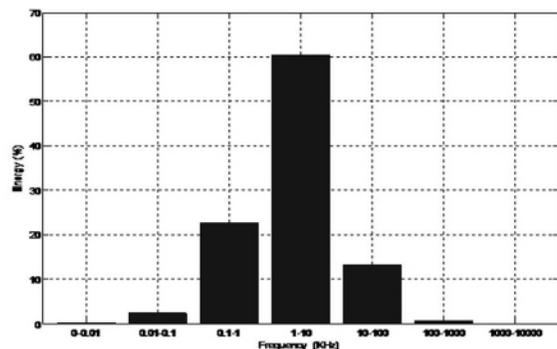


图 6 雷电波能量占总能量的比例图

4 结 论

主要通过用脉冲函数的形式仿真了 2.6/50 μs 的雷电流波形 ,将其与双指数函数进行对比 ,并且对其函数进行傅里叶变换得到雷电流的频谱函数以及能量函数 ,找到了幅频特性和各频率段能量分布。通过以上的仿真计算结果可得如下结论。

(1) 脉冲函数与双指数函数表示的雷电流波形基本一致 ,其波形在下降时均在 50 μs 时达到半幅值 ,这表明雷电流脉冲持续的时间是一样的 ,对防雷保护装置的影响是一样的 ,可以用其进行计算。

(2) 雷电波的频率分量在 0 ~ 30 kHz 时振幅最大 ,即在对雷电流做电磁场分析时 ,可以将主要关注

的频率集中在 0 ~ 30 kHz 之间,故雷电流频率属于低频范围之内。

(3) 对于上升时间越快的雷电流而言,其频率分量的初始振幅值越小,但是其所含的高频分量却越丰富,谐波较多。

(4) 雷电流的能量分布主要集中在 1 ~ 10 kHz, 占总能量的 60.44%。工频附近(0 ~ 100 Hz)的能量只占到总能量的 2.66%。

通过以上的计算分析,明确了雷电流的参数确定、频谱特性及能量分布,为研究雷电对风力发电机产生的电磁干扰过程中,需要重点关注的雷电流频率范围打下坚实基础。

参考文献

[1] 王丽广. 风电机组的防雷保护[J]. 交流技术与电力牵



(上接第 3 页)

表 2 2015 年云南电网输送功率优化前后对比

项 目	云广直流/MW	糯扎渡直流/MW	溪洛渡直流/MW	金中直流/MW	澜上直流/MW	交流通道/MW	南网损耗/MW
优化前	3 000	3 000	3 840	1 920	3 000	1 150	2 325.8
优化后	3 525	3 463	3 183	1 736	1 626	2 369	2 183.7

“十二五”西电东送框架协议的主要内容,至 2015 年,云南电网外送电力规模约占整个南方电网西电东送总规模的 50%,云南电网拟将建成以五回直流、五回交流形成的外送网架。根据交、直流输电损耗的理论,在保持外送功率不变的前提下,不同的各回交、直流通道的输送功率将产生不同的输电损耗;由西电东送协议中安排的各年份各方式电力流来看,云南电网外送电力有一定的裕度,为各通道的输电容量调整提供了可能性。因此,如何安排各回交、直流输电线路的输送功率,使得输电有功损耗最小将是电网节能降耗的有效措施。前面建立了云南电网交直流主通道的最优功率分配模型,运用粒子群优化算法(PSO)求解,获得各输电通道的最优功率分配,从而使电网输电有功损耗降到最小。

计算结果表明,基于所建立的粒子群优化算法,可以优化云南电网交直流输送容量的分配,从而有效降低云南电网外送输电损耗,对电网的节能降耗有明显作用。

参考文献

[1] Kunder P. Power System Stability and Control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 351 - 354.

引 2008(2):37 - 39.

[2] 康春华, 张小青, 王芳. 风电机组的防雷问题[J]. 山西电力, 2006(6): 62 - 64.

[3] C. E. R. Bruce and R. H. Golde. The Lightning Discharge [J]. Inst. Elec. Eng - Pt. 2, 1941, 88: 487 - 520.

[4] F. Heilder. Traveling Current Source Model for LEMP Calculation [M]. In Proc. 6th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat, Zurich, Switzerland, Mar. 1985: 157 - 162.

[5] 张飞舟, 陈亚洲, 魏明, 等. 雷电电流的脉冲函数表示 [J]. 电波科学学报, 2002(17): 51 - 53.

[6] 张小青. 风电机组防雷与接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 21 - 22.

作者简介:

程 锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012 - 04 - 18)

[2] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 陈维荣, 张倩, 王劲草, 等. 搜寻者优化算法在最优潮流中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 64 - 67.

[4] 梁军. 粒子群算法在最优化问题中的研究 [D]. 广西师范大学, 2008.

[5] 陈佳琰, 彭春华. 基于 PSAT 软件的多目标最优潮流计算 [J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(2): 87 - 91.

[6] 王志勇, 梁敬成, 熊小伏, 等. 西电东送输电通道损耗最小最优功率分配方法 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 38 - 41.

[7] 史丹, 任震, 余涛. 高压直流换流站损耗计算软件的开发和应用 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 81 - 83.

[8] 中国南方电网电力调度通信中心. 中国南方电网 2011 年运行方式 [Z]. 广州: 中国南方电网电力调度通信中心, 2011.

作者简介:

曾雪松(1984),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制;

张瀚月(1989),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化,新能源;

廖晨淞(1984),男,硕士,助理工程师,主要从事电力调度工作。(收稿日期:2012 - 03 - 20)