

# 谐波响应特性对接地电极设计的影响研究

张凤鸣

(四川电力物流集团公司, 四川 成都 610016)

**摘要:**接地的目的是提供故障电流和雷电流泄流通道, 保证系统、设备和人员安全。接地功能通过接地装置或接地系统实现, 其中接地电极是最常见的接地装置之一。接地电极的接地特性通常以接地电阻来衡量, 分工频电阻和冲击电阻, 在实际系统运行过程中, 关于接地电极的性质的认识还远远不够。从实际出发, 并结合接地电极的谐波响应特性, 对考虑电极谐波响应特性的设计思想和原则进行研究, 研究成果证明, 考虑谐波响应特性以后, 在特定环境下, 接地电极均有一临界长度, 在进行工程设计和施工时应该考虑这些特性, 可作为施工和设计人员的参考。

**关键词:**接地电极; 泄流通道; 帕斯瓦尔定理; 谐波响应; 施工与设计

**Abstract:** The aim of grounding is to provide the discharging channels for fault current and lightning current and ensure the safety of the system, the equipment and the personnel. The characteristics of grounding electrode are usually presented by grounding resistance which includes power-frequency resistance and impulse resistance, but in fact, the existing understanding is not enough. Based on the practical application, considering the harmonic response characteristics of grounding electrode, the design idea and principle of electrode are researched. The results show that there is a critical length under special circumstance and this may be helpful for the practical application.

**Key words:** grounding electrode; discharging channel; Parseval's theorem; harmonic response; construction and design

**中图分类号:** TM7862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0042-04

## 0 引言

接地装置就是包括引线在内的埋设在地下一个或一组金属体(包括金属水平埋设或垂直埋设的金属网、金属构件、金属管道、钢筋混凝土构筑物基础、金属设备等), 或金属导体组成的金属网, 其功能是用来泄放故障电流、雷电流或其他冲击电流等。这类装置在系统中很多, 如何保证可靠接地, 提高接地装置的保护性能是电力系统非常关注的重要课题。

接地电极在冲击电流和工频电流作用下的响应特性不同, 地极将呈现电感效应, 阻碍电流向地极远端流动。如果接地电极过长, 在冲击电流作用下, 只有部分被利用, 接地电极存在有效长度或临界长度问题。在实际工程中, 接地电极的这一特性往往被忽视, 造成实际运行过程中不必要的设备损坏或绝缘破坏, 其原因在于没有考虑接地电极的谐波响应特性。

在输电线路的防雷接地系统中, 雷电流时间短、电流幅值高、高频成分丰富(频率高至数兆赫兹), 接地电极的电抗部分对整个响应的影响不能忽略, 接地电阻不能再是简单的纯电阻, 而变成了接地阻抗。接

地阻抗与接地电极特征(尺寸、形状)和土壤特性(电阻率、介电常数、磁导率)有关。因此, 通过对雷电流信号进行傅立叶变换, 得到雷电流的频谱和能量频率分布, 通过对垂直接地电极、水平接地电极的 T 型模型分析, 得到用接地电极特征和土壤特性表示的接地阻抗表达式, 再给出了考虑雷电流高次谐波响应特性时, 不同土壤特性的接地电极设计中, 接地电极应该满足的电极基本特征和要求。最后在 PSCAD/EMT-DC 环境下建立雷电流信号模型和接地电极模型进行了仿真, 并对仿真结果进行分析。

立足实际工程中存在的现象和问题, 提出考虑谐波响应特性的情况下, 对接地电极的特性进行研究, 通过理论分析和数字仿真, 提出了一种考虑谐波响应特性的接地电极设计方法和基本思路, 希望对实际工程中接地电极的设计和施工有一定的指导意义。

## 1 非周期信号的傅立叶变换

在周期信号的傅立叶级数中, 当周期增加时基波频率减小, 各谐波分量在频率上愈趋靠近。当周期变成无穷大时, 这些频率分量就形成了一个连续域, 从

而傅立叶级数的求和也就变成了一个积分。为了说明对非周期信号建立傅立叶表示的基本思想,考虑信号  $x(t)$ , 它有有限持续期, 即对某个  $T_1$ , 当  $|t| > T_1$  时,  $x(t) = 0$ , 如图 1(a)。这样可构建一周期信号  $\tilde{x}(t)$ , 使  $x(t)$  是  $\tilde{x}(t)$  的一个周期, 如图 1(b) 所示。当把  $T$  选较大时,  $\tilde{x}(t)$  在更长的时段上与  $x(t)$  一致, 并且随着  $T \rightarrow \infty$ , 对任意有限时间  $t$  值而言  $\tilde{x}(t)$  等于  $x(t)$ 。

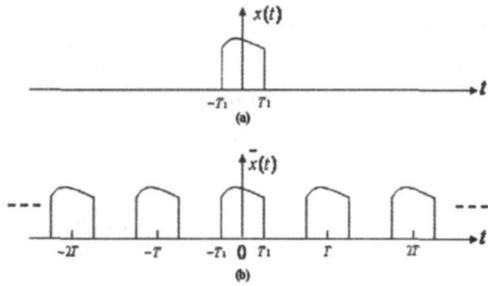


图 1 非周期信号扩展成周期信号

$\tilde{x}(t)$  及其傅立叶级数表示式如下。

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (1)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \tilde{x}(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2)$$

式中,  $\omega_0 = 2\pi/T$  由于在  $|t| < T/2$  内,  $\tilde{x}(t) = x(t)$ , 而在其余地方  $x(t) = 0$ , 所以系数  $a_k$  为

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (3)$$

定义

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

则系数  $a_k$  可以写为

$$a_k = \frac{1}{T} X(jk\omega_0) \quad (5)$$

将  $a_k$  代入式 (1) 得

$$\tilde{x}(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{T} X(jk\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (6)$$

当  $T \rightarrow \infty$ ,  $\tilde{x}(t)$  趋于  $x(t)$ , 式 (6) 的极限即为  $x(t)$ 。再者,  $T \rightarrow \infty$  时, 有  $\omega_0 \rightarrow 0$ , 式 (6) 右边就过渡为一个积分, 得

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (7)$$

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

函数  $X(j\omega)$  称为  $x(t)$  的傅立叶变换或傅立叶积分, 而式 (7) 称为傅立叶反变换。

式 (7) 对非周期信号所起的作用与对周期信号的作用是相同的。两者都把信号表示为一组复指数

信号的线性组合。对周期信号来说, 这些复指数信号的幅度为  $\{a_k\}$ , 并且在成谐波关系的一组离散点  $k\omega_0$ ,  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  上出现。对非周期信号而言, 这些复指数信号出现在连续频率上且根据式 (7), 其“幅度”为  $X(j\omega) d\omega/2\pi$ 。与周期信号傅立叶级数系数所用的术语类似, 非周期信号  $x(t)$  的变换  $X(j\omega)$  通常称为  $x(t)$  的频谱。

## 2 基于帕斯瓦尔定理的雷电流模型

### 2.1 帕斯瓦尔定理

连续时间非周期信号的帕斯瓦尔定理: 若  $x(t)$  和  $X(j\omega)$  是一对傅立叶变换, 则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |X(j\omega)|^2 d\omega \quad (9)$$

该式称为帕斯瓦尔定理。式 (9) 的左边是信号  $x(t)$  的总能量。该定理指出, 总能量既可按每单位时间内的能量 ( $|x(t)|^2$ ) 在整个时间内积分计算, 也可按每单位频率内的能量 ( $|X(j\omega)|^2$ ) 在整个频率范围内积分而得。因此,  $|X(j\omega)|^2$  常称为信号  $x(t)$  的能谱密度。

### 2.2 雷电流模型及其能量谱

雷电流波形广泛采用双指数函数波形。

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为波前衰减系数;  $\beta$  为波尾衰减系数。

根据国际电工委员会提供的 1.2/50  $\mu s$  雷电流参数及相应  $\alpha, \beta$  取值, 见表 1。

表 1 1.2/50  $\mu s$  雷电流参数

波形	波头 ( $\mu s$ )	半值 ( $\mu s$ )	$\alpha (s^{-1})$	$\beta (s^{-1})$
双指数	1.2	50	$1.4e+04$	$4.5e+06$

### 2.3 雷电流频谱

对雷电流进行傅立叶变换, 得到电流幅值随频率的分布, 即频谱。对双指数曲线信号进行傅立叶变换<sup>[6]</sup>得

$$\begin{aligned} i(j\omega) &= \int_0^{\infty} I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt \\ &= I \left( \frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \\ &= \left[ \left( \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left( \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \\ &= I(A + jB) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{令 } A = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2}, B = \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2}$$

双指数模型的幅频响应为

$$i(j\omega) = I \sqrt{A^2 + B^2} = I \frac{\beta - \alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2) + (\beta^2 + \omega^2)}} \quad (12)$$

### 2.4 基于帕斯瓦尔定理的雷电流能量谱

根据帕斯瓦尔定理<sup>[5]</sup>, 信号能量<sup>[7]</sup>为

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} |i(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |i(\omega)|^2 d\omega = \frac{I^2 (\beta - \alpha)^2}{\pi (\beta + \alpha)^2} \left( \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega}{\beta} \right) \Big|_0^{\omega_0} \quad (13)$$

W 称为比能, 反映电流通过单位电阻时产生的能量消耗。

代入参数  $\alpha, \beta$  得总能量为

$$W = 3.5382e-05 I^2$$

同样可得  $(0, \omega_0)$  频率范围内的能量为

$$W' = \frac{I^2 (\beta - \alpha)^2}{\pi (\beta + \alpha)^2} \left( \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega}{\beta} \right) \Big|_0^{\omega_0} = \frac{I^2 (\beta - \alpha)^2}{\pi (\beta + \alpha)^2} \left( \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\omega_0}{\beta} \right) \quad (14)$$

雷电流  $(0, \omega_0)$  频率范围内的能量如表 2。

表 2 雷电流能量频率分布

频率 f (Hz)	能量 ( $\times I^2 R$ )	百分比 (%)
0~1.0e+01	1.0141e-007	0.29
0~1.0e+02	1.0134e-006	2.86
0~1.0e+03	9.5319e-006	26.94
0~1.0e+04	3.0538e-005	86.31
0~1.0e+05	3.4980e-005	98.86
0~1.0e+06	3.5376e-005	99.98
0~1.0e+07	3.5382e-005	100.00

注: 雷电流总能量 =  $3.5382e-005 \times I^2 R$

从表 2 可见, 100 Hz 以下能量百分比只有 2.86%, 大部分能量 (59.37%) 集中在 1~10 kHz 范围内。频率范围 0~0.1 MHz 内时, 能量百分比已经达到了 98.86% 了。这样, 对雷电流可以取上限频率为 0.1 MHz 并认为雷电流的能量几乎全部在上限频率以内。

### 3 接地电极数学模型

考虑雷电流谐波响应时的接地电极模型不再是单一纯电阻, 须引入接地电极自感和电极至土壤零电势面的电容。当用集中参数时, 垂直和水平接地电极的接地阻抗均可用 T 型表示。

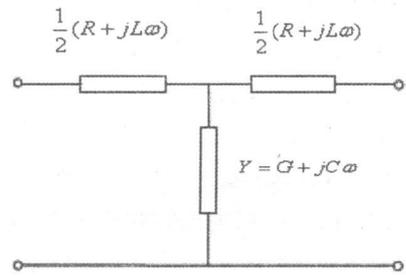


图 2 接地电极阻抗 T 型模型

忽略电阻, 接地阻抗为

$$Z = \frac{j\omega}{2} + \frac{1}{Y} = \frac{j\omega}{2} + \frac{Re}{1 + ReC\omega} = \frac{j\omega}{2} + \frac{Re(1 - ReC\omega)}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} = \frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} + j\omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L\omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2} \quad (15)$$

$$\text{令 } R = \frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2},$$

$$X = \omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L\omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2},$$

则

$$Z = R + jX \quad (16)$$

令 X 为零, 可得临界角频率  $\omega_c$  和临界频率  $f_c$  为

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2Re^2 C - L}{Re^2 C^2 L}}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Re^2 C - L}{Re^2 C^2 L}} \quad (17)$$

阻抗角为

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} \frac{\omega \frac{(\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L\omega^2}{2})}{1 + Re^2 C^2 \omega^2}}{\frac{Re}{1 + Re^2 C^2 \omega^2}} = \tan^{-1} \frac{\omega (\frac{L}{2} - Re^2 C + \frac{Re^2 C^2 L\omega^2}{2})}{Re} = \tan^{-1} \omega \left( \frac{L}{2Re} - ReC + \frac{ReC^2 L\omega^2}{2} \right) \quad (18)$$

### 4 垂直电极与水平电极仿真

基于上述方法, 对垂直和水平接地体在不同参数下的谐波响应特性进行了仿真, 限于篇幅, 仅给出一

种情况下的仿真结果。

垂直接地电极参数:  $\epsilon_r = 10$ ,  $L_e = 1.2 \mu\text{H}/\text{m}$ ,

$d = 0.014 \text{ m}$ ,  $\omega_c = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$

水平接地电极参数:  $\epsilon_r = 10$ ,  $L_e = 1.2 \mu\text{H}/\text{m}$ ,

$d = 0.014 \text{ m}$ ,  $h = 0.6 \text{ m}$ ,  $\omega_c = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/s}$

仿真结果如图 3、图 4 所示。

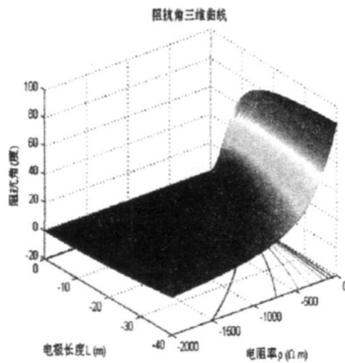


图 3 垂直接地电极  $\theta = f(\rho, l)$  曲线

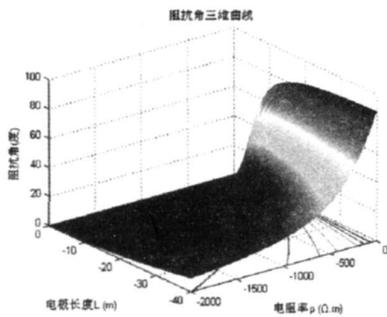
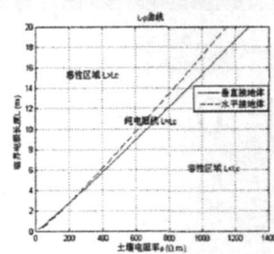


图 4 水平接地电极  $\theta = f(\rho, l)$  曲线

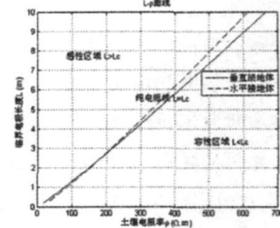
接地电极临界频率与土壤、电极特性的关系和雷电流的上限频率值。如果雷电流的上限频率电流流过接地电极时,电极都能保持在阻性甚至容性,那么接地电极对整个雷电流的所有高频电流成分都不会产生感性响应。为此,接地电极的设计应满足临界频率不小于雷电流的上限频率。由于考虑接地电极的谐波响应特性以后,接地电极有一个临界长度,仿真结果如图 5。

## 5 结 论

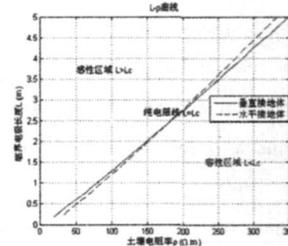
从仿真结果(图 5)可以直接得出结论:当电极长度  $l < l_c$  时接地电极对流过信号呈容性;  $l = l_c$  时接地电极对流过信号呈纯阻;  $l > l_c$  时接地电极对流过信号呈感性。也就是说,接地电极在考虑谐波响应特性的情况下存在一个临界长度,在进行工程设计和施工时应该考虑该因素。



(a)



(b)



(c)

图 5 垂直接地电极与水平接地电极的临界长度比较

## 参考文献

- [1] 何金良,曾嵘.电力系统接地技术(第一版)[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 何金良.接地导体的设计[J].电力建设,1995(6).
- [3] GB 50057-94,建筑物防雷设计规范[S].2000.
- [4] [日]川濑太郎[著].接地技术与接地系统.冯允平[译][M].北京:科学出版社,2001.
- [5] Alan V. Oppenheim, Alan S Willsky等[著].刘树棠[译].信号与系统(第二版).西安交通大学出版社,1998.
- [6] 叶根.雷电流特性研究与频谱分析[D].云南师范大学硕士论文,2006.
- [7] 罗仕乾.雷电波的频谱及能量分布[J].高电压技术,1995,(1):85-86.
- [8] Aguado M.; Hemoso B.; Senosiain V.; Martinez-cid P. eds. Lightning earthing electrodes harmonic response [J]. High Voltage Engineering 1999. Eleventh International Symposium on (Conf Publ No 467) Volume 2, 23-27 Aug 1999; 262 - 266.

(下转第 88 页)

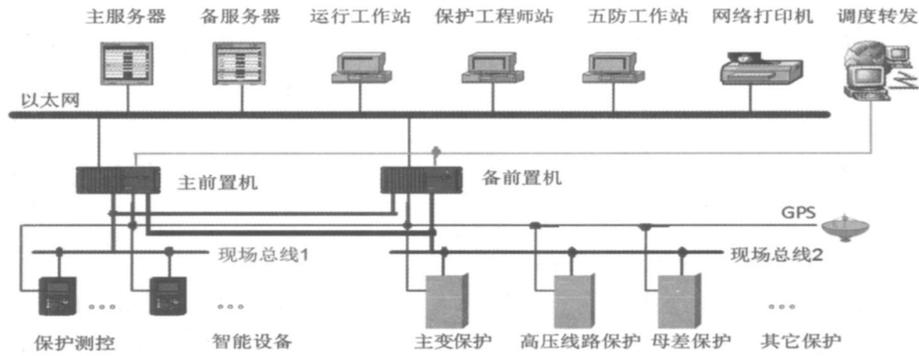


图 2 110 kV 变电站典型系统配置

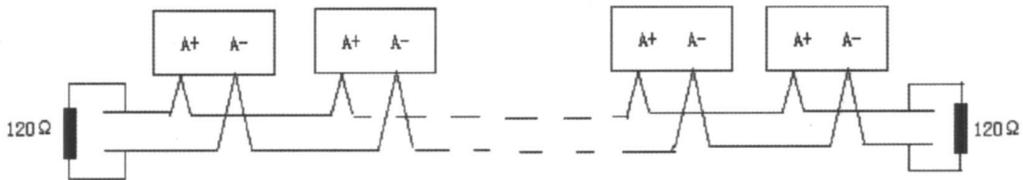


图 3 CAN 网匹配电阻的连接

和 RS485 难以胜任,应考虑选择现场总线网络。现场总线网将所有节点连接在一起,可以方便地增减节点,一般可连接 110 个节点;具有点对点、一点对多点和全网广播传送数据的功能。

由于以上原因,目前自贡电业局 110 kV 变电站的综合自动化系统中相当部分采用 CAN 通信,总的情况运行稳定可靠。CAN 组网结构见图 2。

CAN 通讯方式虽比 RS485 具备较强优势,但在具体的运用中也可能遇到一定的问题,需要在实践中不断摸索、掌握,并加以改进。特别要注意的是 CAN 的抗干扰问题和带负荷能力的问题。在自贡电业局 110 kV 沿滩变电站 1 号主变压器综合自动化改造时,站内共有 26 保护测控装置,经过比较选用了 CAN 组网。在运行中出现总控单元与测控单元通信时断时通的现象,经查是由于通讯电缆较长、且 CAN 网两端电阻不匹配引起反射驻波,后在 CAN 网两端各并了一个 120 Ω 的电阻后问题得到解决(见图 3)。

在 110 kV 沿滩变电站 2 号主变压器扩建工程中,保护测控装置的数量增加到了 36 个,都接在 CAN1 口,在调试中发现远传遥测量数据丢失了一部分,经过

反复检查,最后发现是由于 CAN1 口带的设备超过了 32 个引起的,后将部分装置接入 CAN2 口后故障消失。

## 4 结 论

通过以上对综合自动化系统通信方式介绍,知道了各种通信方式的优缺点和适用范围。知道了 CAN 在 110 kV 变电站综合自动化通信中重要作用和应该注意的问题,对以后在变电站综合自动化系统组网选择和故障处理方面有一定的帮助。

## 参考文献

- [1] DL/T 634—1997, 远动设备及系统(第 5 部分:传输规约)[S].
- [2] DL/T 634.5104—2002, IEC 60870—5—104—2000. 远动设备及系统(第 5—104 部分:传输协议)[S].
- [3] 赵渊,沈智健. 基于 TCP/IP 的 IEC60870—5—104 远动规约在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2003, (10): 56—60.

(收稿日期: 2009—06—30)

(上接第 45 页)

- [9] 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D]. 中国农业大学. 博士论文, 2000.
- [10] [美] 爱·弗·万斯[著]. 高攸刚, 吕英华[译]. 电磁场对屏蔽电缆的影响[M]. 人民邮电出版社, 1988.
- [11] Rakotmalala A.; Auriol Ph.; Rousseau A. eds

Lightning distribution through earthing systems IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 1994, 419.

- [12] 张三慧. 大学物理学—电磁学(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—06—22)