

10 kV 中压电力线信道传输特性测量与研究(二)

—— 信道传输路径损失

杨晓宪, 郑 涛, 张保会, 李常信, 童礼系
(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 从传输线理论出发, 研究了 10 kV 电力网络信道的传输路径损失, 并通过 2 座变电站的不同辐射状馈线, 采用信号发送/接收方式测量了信道的路径损失, 分析了影响信道路径损失的因素, 主要包括: 电力网络结构、并联电容器以及耦合方式等, 验证了理论分析结果。研究表明, 对信道路径损失影响最大的是 TX/RX 间接入的电气元件, 例如配电变压器、分支线等所引起的分流衰耗。网络其他部分对信道间路径损失的影响较小。变电站母线上的并联补偿电容器组对信道路径损失几乎没有影响。通过分支线接入信道的元件的等值阻抗将被分支线本身所“平滑”。当元件阻抗值较低时, 这一“平滑”效应有利于降低其对信道产生的分流衰耗。相相耦合方式较相地耦合有较低的传输路径损失。在研究的频段, 大致低 5~15 dB。

关键词: 电力线通信; 路径损失; 载波信号

中图分类号: TN 915.853

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0006-07

0 引言

本文是 10 kV 电力线信道传输特性研究的第 2 部分。在第 1 部分, 主要研究了电力线信道传输的一般特性, 信道的时变性和时间选择性衰落, 时间色散即时延扩展和频率选择性衰落。在第 2 部分则主要研究信道传输路径损失, 特别是电网中的各个元件例如分支线、配电变压器、母线设备等对路径损失的影响。由于第 1 部分所提及的技术上的原因, 信道传输路径损失的现场测量均是在 2 座变电站的辐射状馈线上进行的。任意波形发生器(AWG)作为信号源(TX), 频谱分析仪(SA)作为接收机(RX)。使用的仪器设备型号和参数、原始数据的处理原则等参见第 1 部分。测量时馈线均处于带电状态。变电站的主要设备配置和运行参数见文献[1]。

1 信道路径损失的一般特性

图 1 是在河滨变电站一回馈线测得的路径损失(幅频响应)。馈线长 3.22 km, 中间未接任何分支线路。耦合方式为相地耦合。AWG 的发送电平设定为 +16 dBm; 频率范围 40 kHz~1.5 MHz, $\Delta f=10$ kHz。同时, 为了比较, 图 2、3 分别给出了曾经在 110 kV 和 330 kV 输电线路测得的路径损失结果, 测量在停电状态进行, 线路两侧均与母线断开。相地耦合方式, 频率范围 40~500 kHz, 发送电平均为 0 dBm。其中, 110 kV 线路长 5.4 km, 全线无分支线; 330 kV 线路长 233.1 km, 中间接入 2 段分别长 3.25 km 和 4.1 km 的分支线。

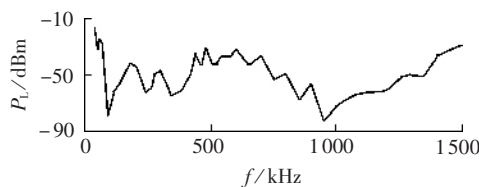


图 1 10 kV 馈线信道的路径损失

Fig.1 Path loss of a 10 kV feeder channel

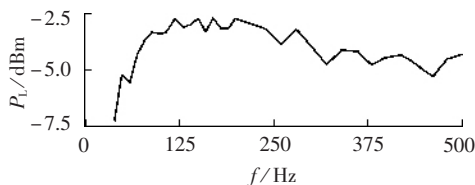


图 2 110 kV 输电线路信道的路径损失

Fig.2 Path loss of a 110 kV transmission line channel

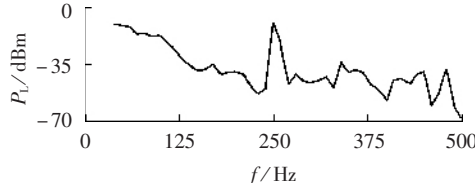


图 3 330 kV 输电线路信道的路径损失

Fig.3 Path loss of a 330 kV transmission line channel

图 1 表明, 10 kV 电力线信道的路径损失大致为 10~20 dB/km, 远大于图 2 和图 3 所示的输电线路信道同频段的结果。文献[2]也得到类似的结果。与 10 kV 电力线信道开放的总线结构不同, 110 kV 及以上的高压输电线路均采用终端加装线路阻波器的方式组织通信信道, 对于通信信号而言这是一种封闭结构。因此可以认为, 不同电力线信道的物理结构(杆塔类型、线间距离、对地距离等)和网络结构将导致不同路径损失, 本文关注的是后一个因素。

另一方面,图 1~3 表明信道的幅频响应曲线随频率增加而衰减振荡。根据传输线理论^[3-4],衰减反映了信道的低通特性,振荡则表现了由于终端阻抗失配和多径传输引起的频率选择性。这表明,尽管电力线信道实际存在着多种传输模式,它的基本传输特征例如衰减性、振荡性、频率相关性等仍然可以用传输线理论予以物理上的解释。因此,下面采用传输线模型对信道传输路径损失进行详细的分析。

均匀传输线模型如图 4 所示,图中 E_G 为电源电压; Z_G 为电源内阻; Z_C 为传输线特性阻抗; Z_L 为负载阻抗,取为实数; $\gamma = \alpha + j\beta$ 为传输常数,其中 α 为衰减常数, β 为相移常数。

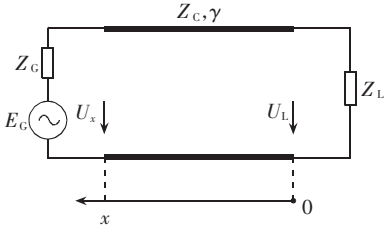


图 4 均匀传输线模型

Fig.4 A uniform transmission line model

考虑负载阻抗 Z_L 与特性阻抗 Z_C 不匹配的一般情况下传输线的路径损失。设距负载 x 处的阻抗为 Z_x ,则该处的电压 U_x 和功率 P_x 分别为

$$U_x = \frac{Z_x}{Z_G + Z_x} E_G$$

$$P_x = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{U_x I_x^*\} = \frac{1}{2} |U_x|^2 \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{Z_x^*}\right\} = \frac{Z_x}{2(Z_G + Z_x)^2} E_G^2$$

负载处的电压 U_L 和功率 P_{load} 分别为

$$U_L = \frac{E_G}{Z_G + Z_x} (Z_x \cosh \gamma l - Z_C \sinh \gamma l)$$

$$P_{\text{load}} = \frac{E_G^2}{2 Z_L (Z_G + Z_x)} (Z_x \cosh \gamma l - Z_C \sinh \gamma l)^2$$

于是可以得到传输路径损失 P_L 为

$$P_L = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{P_{\text{load}}} = \frac{1}{2} \ln \frac{Z_L Z_x}{(Z_x \cosh \gamma l - Z_C \sinh \gamma l)^2} \quad (\text{Np})$$

由于 $Z_x = Z_C \frac{1 + \Gamma_x e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_x e^{-2\gamma l}} = Z_C \frac{Z_L \cosh \gamma l + Z_C \sinh \gamma l}{Z_L \sinh \gamma l + Z_C \cosh \gamma l}$, 将其代入上式并化简可得:

$$P_L = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{1}{4 Z_L Z_C} [(Z_L + Z_C)^2 e^{2\alpha l} e^{j2\beta l} - (Z_L - Z_C)^2 e^{-2\alpha l} e^{-j2\beta l}] \right\} \quad (1)$$

注意到上式中 $e^{j2\beta l}$ 是振荡因子,可得路径损失的最大、最小值分别为

$$P_{L,\max} = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{1}{4 Z_L Z_C} [(Z_L + Z_C)^2 e^{2\alpha l} + (Z_L - Z_C)^2 e^{-2\alpha l}] \right\} \quad (2)$$

$$P_{L,\min} = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{1}{4 Z_L Z_C} [(Z_L + Z_C)^2 e^{2\alpha l} - (Z_L - Z_C)^2 e^{-2\alpha l}] \right\} \quad (3)$$

它们之间的差 ΔP_L 为

$$\Delta P_L = P_{L,\max} - P_{L,\min} = \frac{(Z_L - Z_C)^2}{2 Z_L Z_C} e^{-2\alpha l}$$

随着传输线长度 l 的增加, ΔP_L 减小而趋于 0, 此时可得:

$$P_L = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(Z_L + Z_C)^2}{4 Z_L Z_C} e^{2\alpha l} \right] = \alpha l + \ln \frac{Z_L + Z_C}{2 \sqrt{Z_L Z_C}} \quad (4)$$

式中第 1 项是传输线的固有损耗,第 2 项是负载阻抗 Z_L 与传输线特性阻抗 Z_C 之间的失配损耗。当 $Z_L = Z_C$, 即传输线终接匹配负载时,该项为零,此时路径损失就是传输线的固有损耗。

以上分析表明,在负载终端接非匹配负载的一般情况下,传输线的路径损失随着传输长度和信号频率的变化在最大、最小值间振荡;当线路较长时,则等于传输线的固有损耗与终端失配损耗之和。

2 网络结构对信道路径损失的影响

10kV 电力线信道可以视为 2 种不同基本单元的组合,一种是不同二次参数传输线构成的串联单元,一种是并联单元。

2.1 不同二次参数串联信道路径损失

在图 5 所示的传输线串联模型中,类似于上节的分析,可分别求出距负载 x_2 处及负载处的功率 P_{x2} 和 P_{load} 分别为

$$P_{x2} = \frac{Z_{x2}}{2(Z_G + Z_{x2})^2} E_G^2$$

$$P_{\text{load}} = \frac{E_G^2}{2 Z_{x1}^2 Z_L (Z_G + Z_{x2})^2} (Z_{x1} \cosh \gamma_1 l_1 - Z_{C1} \sinh \gamma_1 l_1)^2 \times (Z_{x2} \cosh \gamma_2 l_2 - Z_{C2} \sinh \gamma_2 l_2)^2$$

式中 $Z_{x2} = Z_{C2} \frac{1 + \Gamma_{x2}}{1 - \Gamma_{x2}}$, Γ_{x2} 为 x_2 处向负载端看进去

的反射系数; $Z_{x1} = Z_{C1} \frac{1 + \Gamma_{x1}}{1 - \Gamma_{x1}}$, Γ_{x1} 为 x_1 处向负载端看进去的反射系数。

传输路径损失则为

$$P_L = \frac{1}{2} \ln \frac{P_x}{P_{\text{load}}} = \frac{1}{2} \ln (Z_L Z_{x2} Z_{x1}^2) / [(Z_{x1} \cosh \gamma_1 l_1 - Z_{C1} \sinh \gamma_1 l_1)^2 (Z_{x2} \cosh \gamma_2 l_2 - Z_{C2} \sinh \gamma_2 l_2)^2] \quad (5)$$

若 $Z_{C1} = Z_{C2} = Z_C$, 且 $Z_L = Z_C$, 则 $Z_{x1} = Z_{x2} = Z_C$, 有

$$P_L = \alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 \quad (6)$$

上式表明,匹配串联联接时,总的路径损失等于各段传输线固有损耗之和。

若 $Z_L = Z_{C1}$, 则 $Z_{x1} = Z_{C1}$, 有

$$P_L = \alpha_1 l_1 + \frac{1}{2} \ln \frac{Z_{x2} Z_{C1}}{(Z_{x2} \cosh \gamma_2 l_2 - Z_{C2} \sinh \gamma_2 l_2)^2}$$

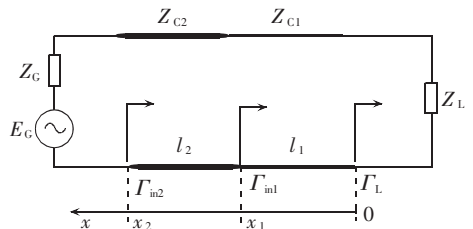


图 5 传输线串联模型

Fig.5 Series transmission line model

显然,上式第 2 项与式(1)具有同样结构,因此可以得到与其类似的结论,即当 l_2 较长时,有

$$P_L = \alpha_1 l_1 + \alpha_2 l_2 + \ln \frac{Z_{C1} + Z_{C2}}{2\sqrt{Z_{C1}Z_{C2}}} \quad (7)$$

上式表明,当传输线是由 2 段不同二次参数的线段串联组成时,若负载端是匹配的,则总的路径损失等于各段线路的固有衰减与它们特性阻抗间的失配衰减之和。

2.2 不同二次参数并联信道的路径损失

带有一段并联分支线的基本单元如图 6 所示,为简化分析,设主线段 l 是均匀且终端匹配的。并联分支线对路径损失的影响可以用分流衰减 A_b 表征,它定义为^[5]

$$A_b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{L1}}{P'_{L1}} \text{ (Np)} \quad (8)$$

式中 P_{L1} 、 P'_{L1} 分别为分支线接入前、后负载阻抗 Z_{L1} 上得到的功率。

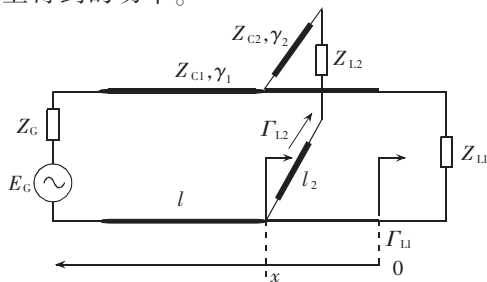


图 6 传输线并联模型

Fig.6 Parallel transmission line model

由图 6,接入分支线 l_2 前、后负载 Z_{L1} 上得到的电压 U_{L1} 和 U'_{L1} 分别为

$$U_{L1} = \frac{1}{2} E_G e^{-\gamma_1 l} \quad (9)$$

$$U'_{L1} = \frac{1}{2} E_G e^{-\gamma_1 l} (1 + \Gamma_x) \quad (10)$$

这里

$$\Gamma_x = \frac{Z_{1x} // Z_{2x} - Z_{C1}}{Z_{1x} // Z_{2x} + Z_{C1}} \quad (11)$$

$$Z_{1x} = Z_{C1} \frac{1 + \Gamma_{L1} e^{-2\gamma_1 x}}{1 - \Gamma_{L1} e^{-2\gamma_1 x}}, \quad \Gamma_{L1} = \frac{Z_{L1} - Z_{C1}}{Z_{L1} + Z_{C1}}$$

$$Z_{2x} = Z_{C2} \frac{1 + \Gamma_{L2} e^{-2\gamma_2 l_2}}{1 - \Gamma_{L2} e^{-2\gamma_2 l_2}}, \quad \Gamma_{L2} = \frac{Z_{L2} - Z_{C2}}{Z_{L2} + Z_{C2}}$$

注意到终端匹配时 $Z_{x1} = Z_{C1}$,由式(8)可得在 x 处接入分支线 l_2 后的分流衰减为

$$A_b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{L1}}{P'_{L1}} = \ln \left| \frac{U_{L1}}{U'_{L1}} \right| = \ln \left| \frac{1}{1 + \Gamma_x} \right| = \ln \left| 1 + \frac{Z_{C1}}{2Z_{2x}} \right| \quad (12)$$

注意到 Z_{2x} 的最大、最小值分别为

$$Z_{2x, \max} = Z_{C2} \frac{1 + |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}{1 - |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}$$

$$Z_{2x, \min} = Z_{C2} \frac{1 - |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}{1 + |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}$$

$$0 \leq |\Gamma_{L2}| \leq 1$$

它们均是实数。代入上式,可得分流衰减 A_b 的最大、最小值为

$$A_{b, \max} = \ln \left(1 + \frac{Z_{C1}}{2Z_{C2}} \frac{1 + |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}{1 - |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}} \right) \quad (13)$$

$$A_{b, \min} = \ln \left(1 + \frac{Z_{C1}}{2Z_{C2}} \frac{1 - |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}}{1 + |\Gamma_{L2}| e^{-2\alpha_2 l_2}} \right) \quad (14)$$

由式(12)~(14)可得 3 点结论。

a. 因为 $A_{b, \min} > 0$,表明分支线的引入总是要产生分流衰减。在主线段终端匹配的情况下,分支线产生的分流衰减与分支线在主线段上的接入位置无关。

b. 若分支线终接非匹配阻抗, A_b 随着分支线的长度 l_2 和信号频率的变化在 $A_{b, \max}$ 、 $A_{b, \min}$ 间振荡;随着 l_2 的增加, $A_{b, \max}$ 减小, $A_{b, \min}$ 增大,当 l_2 较大时, $A_b = A_{b, \max} = A_{b, \min} \ln [1 + Z_{C1} / (2Z_{C2})]$,它与分支线的终端状态无关。若 $Z_{C2} = Z_{C1}$,则 $A_b = 3.5 \text{ (dB)}$ 。

c. 如果分支线终接匹配负载,即 $\Gamma_{L2} = 0$,并设 $Z_{C2} = Z_{C1}$,则

$$A_b = A_{b, \max} = A_{b, \min} \ln 1.5 \approx 0.4 \text{ (Np)} = 3.5 \text{ (dB)}$$

2.3 实际运行网络信道的路径损失

在实际的电力线网络中,通信收发信机 TX/RX 间的信道特性取决于上述分析的基本串联单元和并联单元特性的综合。然而,当 TX/RX 固定后,电网中的母线设备、相邻线路、分支线路、配电变压器诸元件对 TX/RX 间信道的影响则均可以归结为并联分支线效应。另一方面,在运行电网进行信道传输特性测量时,单独考察串联特性是相当困难的。因此,这里重点考察分支线的并联效应。

2.3.1 并联分支线中间接入

图 7、8 是河滨变电站另一回馈线(馈线 2)路径损失测量结果,线路长度 3.27 km,馈线上接有 14 台配电变压器,总容量 4310 kV·A。除了 1 台 100 kV·A 的配电变压器是通过 7 m 左右的引下线直接接入馈线外,其余分别通过 3 回分支线接入馈线。为了比较,将图 1(馈线 1)的结果也画在图 7、8 中,可以看出,它们大约相差 15 dB。事实上,如图 8 所示,馈线 2 与图 1 中的馈线是结构基本相同的双回线路。因此,双回馈线路路径损失的差别只可能是由于馈线 2 上接入的分支线和配电变压器产生的分流衰减引起的,它们可以应用 2.2 节的模型进行分析。

在分流衰减中,需要着重讨论配电变压器引起的分流衰减问题。电力网络中的配电变压器对信道的影响与其接入方式有关。如图 8 中馈线 2 所示,它们可以分为直接接入信道,例如 1 号变压器;或通过

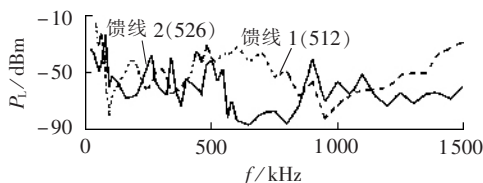
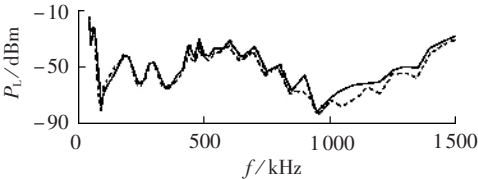


图 7 河滨变电站双回馈线路的路径损失

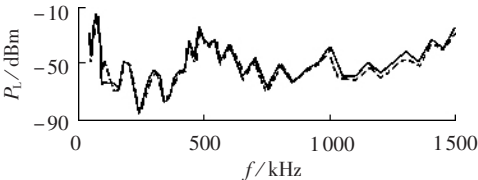
Fig.7 Path loss of double feeders in Hebin substation

间的距离较短,则可以将其计入直接接入信道类型,而将其他部分作为分支线考虑。以此类推。更一般地,分支线的存在总能起到“平滑”末端阻抗的作用,使得较小的阻抗不致在信道上产生较大的分流衰耗。这一结论同样将被下面的测量结果所证实。

被测信道中接入分支线不仅产生分流衰耗,当终端失配时,还将改变信道传输的对称性。图 11、12 分别为河滨变电站馈线 1、2 首末端互为收、发信端时路径损失的测量结果(实线为正向传输,虚线为反向传输)。馈线 1 无分支线接入,它的信道传输特性基本上是对称的;馈线 2 有分支线接入,传输特性的不对称性较为明显。这个特性与低压电力网络信道的传输特性也是类似的^[7-10]。对于双向通信系统,信道的这种不对称性在收发信机的功率设计中应予以充分的关注。



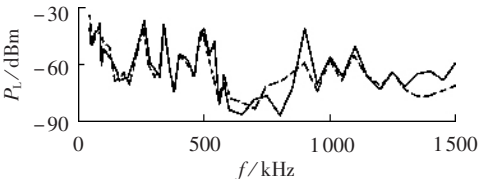
(a) 相地耦合



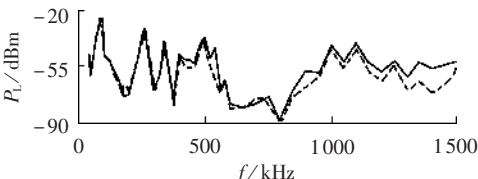
(b) 相相耦合

图 11 馈线 1 传输对称性

Fig.11 Symmetry for signal transmission through feeder 1



(a) 相地耦合



(b) 相相耦合

图 12 馈线 2 传输对称性

Fig.12 Symmetry for signal transmission through feeder 2

2.3.2 并联分支线终端接入

电力线信道总是“嵌在”电力网之中的,被测信道以外电网部分对于信道的影响可以考虑为通过并联分支线分别接入被测信道的发信端和收信端。这些部分所引起的分流衰耗同样可采用 2.2 节的方法分析。对于双向通信系统,通信过程中发、收信端是互换的。因此,这里仅考察发信端并联分支线的情形。

图 13、14 是陶乐变电站一回馈线(522 线路)发信端带有不同运行线路时测量接线和测量结果。其中,523 线路长 2.26 km;带有 1 个分支,长 1.59 km;4 台配电变压器,总容量 700 kV·A。514 线路长 2.59 km;带有 9 个分支,长 3.54 km;20 台配电变压器,总容量 2715 kV·A。测量结果表明,尽管发信端带有不同的线路抑或未接线路,被测线路的路径损失几乎没有变化,即不受发信端是否并联分支线的影响。这一现象可以作如下解释。如图 13 所示,不同分支线均是通过一段线路接入发信端的,根据 2.2 节的分析,这段线路将起着“平滑”阻抗的作用,即使得并联分支线的输入阻抗趋于被测信道的特性阻抗。当它们相等时,并联分支线产生的分流衰耗是 3.5 dB。这一数值很容易被测量误差所淹没。因而上述现象是合理的。

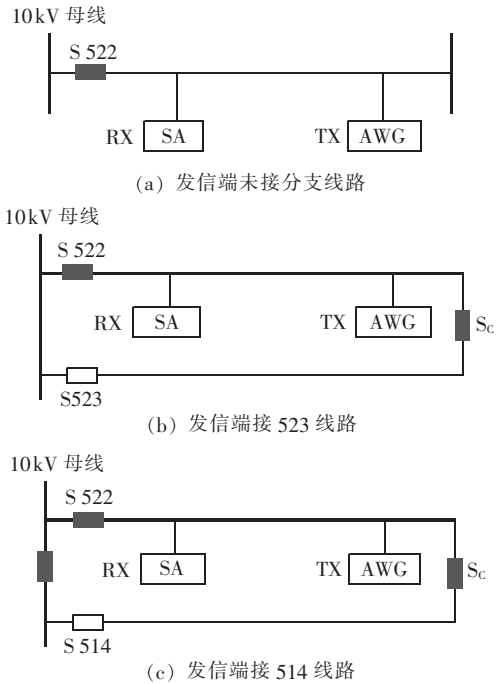


图 13 发信端带有不同分支线时的测量接线

Fig.13 Wiring for the path loss measurement with different branches at the head side

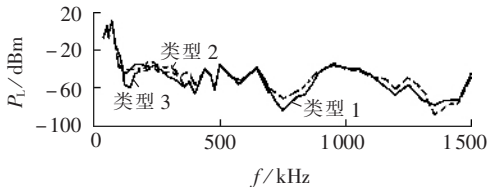


图 14 发信端带有不同分支线时的路径损失

Fig.14 Path loss with different branches at transmitter

从另一个角度考察终端并联分支线对被测信道传输特性的影响。上述被测信道在带电/停电时的传输特性如图 15 所示,其中带电时的测量接线与图 13 (a)相同;停电测量时 TX/RX 两端均无并联分支线。非常明显,无论是相地耦合还是相相耦合,停电时被测信道的路径损失并不小于带电时的情形。这充分说明,前述关于终端并联分支线影响的分析是正确的。至于路径损失在某些频段还大于带电时的现

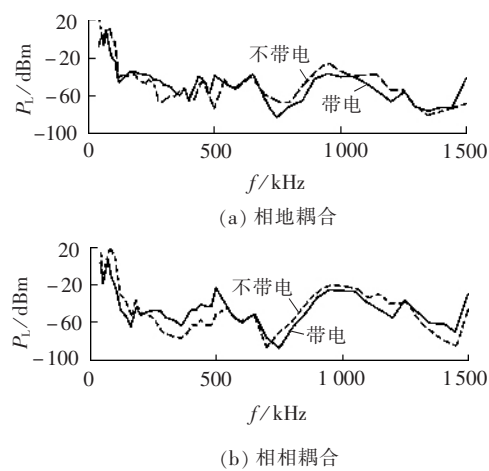


图 15 馈线停电/带电时的路径损失
Fig.15 Path loss with online/offline mode

象,则可能是由于终端开路时反射功率最大,在这些频段造成的功率相消的效应也较大的缘故。

2.3.3 并联电容器组对路径损失的影响

变电站 10 kV 母线上通常配置用于改善电压和无功流向的并联补偿电容器组,它是一个很大的容性负载。根据配置容量的不同,电容器组的电容量大致在数百微法数量级,对于高频信号近似于短路。因此,研究电容器组对馈线传输特性的影响。尽管理论上它也可归结为 2.2 节的情形进行分析,作为一种可能对高频信号十分敏感的母线设备,直接观察它的影响是有益的。在 2 个变电站测量了电容器组投切前后信道的路径损失。河滨变电站电容器组的容量是 3 000 kvar,通过约 40 m 的 YJLV₂₃₃×240 mm² 电缆接入 10 kV 母线;陶乐变电站是 5 000 kvar,与 10 kV 母线的电气距离约 60 m,电缆型号与河滨变电站的相同。它们都串联了 6 % 的电抗器。电容器组为星型接线,中性点不接地。信道路径损失的测量接线如图 16 所示。图 17、18 分别是 2 个变电站相相耦合和相地耦合 2 种模式的测量结果(图中 1 为 BG 相,电容器退出;2 为 BG 相,电容器投入;3 为 AB 相,电容器退出;4 为 AB 相,电容器投入)。其中,河滨变电站在测量时电容器组由于本身故障跳闸,只测量了相相耦合模式,频率范围 40~400 kHz。可见,无论是相地耦合还是相相耦合,电容器组投切前后传输路径损失几乎没有变化。这种现象应该与馈线电缆的阻抗“平滑”作用以及电容器组的接线方式有关。无论如何,它对于信号传输是十分有利的。

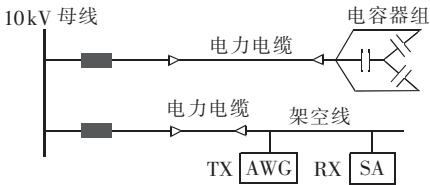


图 16 电容器组对信道传输特性影响测量接线图
Fig.16 Wiring for the measurement of the impact of capacitor group on channel transmission property

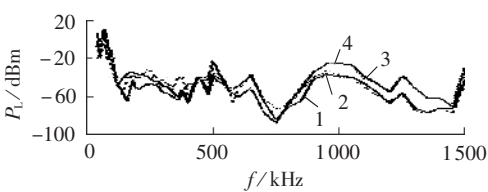


图 17 陶乐变电容器组对信道传输特性影响
Fig.17 Capacitor group impact on the transmission properties in Taole substation

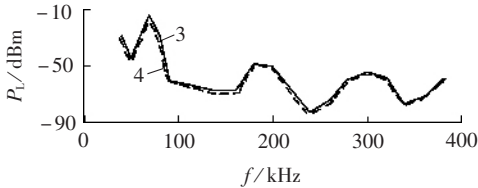


图 18 河滨变电容器组对信道传输特性影响
Fig.18 Capacitor group impact on the transmission properties in Hebin substation

3 不同耦合模式的路径损失

10 kV 电力线通信可采用相相耦合和相地耦合 2 种传输模式,因此有必要分别对它们进行考察。图 19~21 分别为前述 2 座变电站 3 回馈线在不同耦合模式时路径损失的测量结果(图中实线为相地耦合模式,虚线为相相耦合模式)。图 19 是馈线上无分支线的情况;图 20、21 中的馈线则均接有分支线。从图中可见,尽管 2 座变电站的不同馈线有些差别,相相耦合较相地耦合的传输路径损失要低一些,约在 5~15 dB 范围。总之,与通常推测的不同,相相耦合在降低传输路径损失方面并没有特别明显的效果。

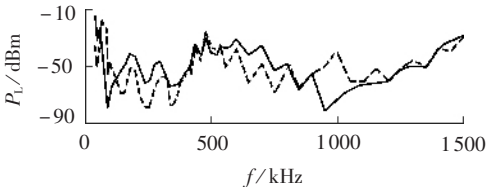


图 19 河滨变 512 馈线不同耦合方式的路径损失
Fig.19 Path loss through feeder 512 in different coupling modes in Hebin substation

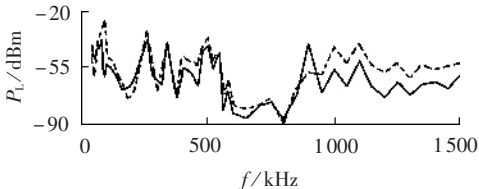


图 20 河滨变 526 馈线不同耦合方式的路径损失
Fig.20 Path loss through feeder 526 in different coupling modes in Hebin substation

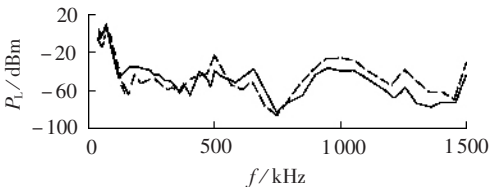


图 21 陶乐变 522 馈线不同耦合方式的路径损失
Fig.21 Path loss through feeder 522 in different coupling modes in Taole substation

在有些频段,例如图 19 中的河滨变 512 馈线的 800 kHz 以下,相相耦合的路径损失甚至大于相地耦合。另一方面,相相耦合要比相地耦合需要更多的耦合设备,增加了接入费用。因此,在实际通信中采用何种传输方式,需要综合权衡。

4 结论

a. 10 kV 电力线网络信道传输特性与其总线型的网络结构有关,它的传输路径损失通常远大于封闭结构的高压输电线路信道。在 TX/RX 间无其他电气元件的情况下,在数十千赫兹至 1.5 MHz 的频率范围内,相地耦合时,每千米路径损失为 10~20 dB。

b. 在 10 kV 电力网络中,对信道路径损失影响最大的是 TX/RX 间接入的电气元件,例如配电变压器、分支线等所引起的分流衰耗。通过分支线接入信道元件的等值阻抗将被分支线本身所“平滑”。当元件阻抗较低时,这一“平滑”效应有利于降低其对信道产生的分流衰耗。

c. 网络的其他部分对信道的影响可以等效为接入 TX/RX 两端的并联分支效应,它们对信道间路径损失的影响较小,大致在几个分贝数量级。变电站母线上的并联补偿电容器组对信道的路径损失在相相耦合和相地耦合时均几乎没有影响。

d. 相相耦合方式较相地耦合有较低的传输路径损失,但两者的差别不是特别明显。在研究的频段,总体上看,相相耦合时大致低 5~15 dB。

参考文献:

- [1] YANG Xiao-xian,ZHENG TAO,ZHANG Bao-hui. Measurement and research of channel noise distributed characterization in low voltage networks[C]//Proceedings-2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Asia and Pacific. Dalian,China;[s.n.],2005:1-7.
- [2] SULJANOVIĆ N,MUJČIĆ A. High-frequency characteristics of

high-voltage power line[C]//Proceedings of the IEEE EUROCON 2003 L. S. Croatia:IEEE,2003:310-314.

- [3] KONG J A. Electromagnetic wave theory[M]. New York:Wiley Interscience,1990.
- [4] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [5] 焦邵华,刘万顺,郑卫文,等. 配电网载波通信的衰耗分析[J]. 电力系统自动化,2000,24(8):37-40.
JIAO Shao-hua,LIU Wan-shun,ZHENG Wei-wen,et al. Attenuation analysis of distribution line carrier channels in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(8):37-40.
- [6] 李艳龙,陈维千. 在城市 10 kV 配网上实现载波通信[J]. 电力系统通信,2001,22(3):5-11.
LI Yan-long,CHEN Wei-qian. Realization of carrier communications over the city 10 kV power distribution network[J]. Power System Communications,2001,22(3):5-11.
- [7] DOSTERT K. Powerline communications[M]. NJ,USA:Prentice-Hall PTR,2001.
- [8] RECROSIO N,FINE G. Analysis of radiation characteristics of distribution line carriers with the NEC Code[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility,1993,35(1):55-68.
- [9] LIU D,FLINT E. Wide band AC power line characterization[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics,1999,45(4):1087-1097.
- [10] MENG H,CHEN S,GUAN Y L,et al. Modeling of transfer characteristics for the broadband power line communication channel [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(3):1057-1064.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

杨晓宪(1954-),男,江苏金湖人,博士研究生,主要从事电力线通信研究;

郑涛(1977-),男,河北大名,人,博士研究生,主要从事电力线通信研究(E-mail:zta_none@sohu.com);

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为电力系统继电保护、暂态和稳定、电力线通信;

李常信(1983-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事电力线通信研究;

童礼系(1984-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定和电力线通信研究。

Measurement and research of channel transmission properties on 10 kV medium voltage power lines

Part 2: Path loss

YANG Xiao-xian,ZHENG Tao,ZHANG Bao-hui,LI Chang-xin,TONG Li-xi

(School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: The path loss over the 10 kV medium voltage power line channels using the transmission line theory is analyzed. The path loss is obtained from field test of different feeders in two substations employing the signal transmitting/receiving mode. Impacts on the path loss are analyzed including the power network structure,parallel-connected capacitor and coupling modes. Results show that electrical equipments between the TX and RX affect the path loss most. These equipments including distribution transformers and branches introduce some drain losses. Other parts of the network have little impact on the path loss. In addition,parallel compensation capacitor groups connected to the bus almost have no effect on the path loss. The equivalent impedance of any component wired into the network through a branch has been smoothed by that branch. If the impedance of the equipment is lower,thus smoothness favors the reduction of the drain loss caused by the corresponding equipment. The path loss is lower in phase to phase coupling than that in phase to ground coupling. In the frequency range of interest,the corresponding value is 5~15 dB.

Key words: power line communications; path loss; carrier signal