

6-1-2020

## Influence of Reactive Power Compensator on Power Line Communication Channel Characteristics

Wangbin Cao

*School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Chengqun Yin

*School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Limei Sun

*School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Xuecai Li

*School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Influence of Reactive Power Compensator on Power Line Communication Channel Characteristics

### Abstract

**Abstract:** Reactive power compensator is an important equipment which is widely used in power system. To study the influences of reactive power compensator on power line communication (PLC), *the impedance characteristics of the reactive power compensator in the range of 50 Hz~1 MHz were measured, and the variation rule of the reactive power compensator impedance was proposed. The high frequency characteristics of dielectric materials in reactive power compensator were analyzed. And the high-frequency lumped parameter model and high-frequency two-port network model of reactive power compensator were proposed. The power line parameters-deterministic model was established based on the transmission line theory. The reactive power compensator effects on the transmission characteristics and capacity of PLC channel were further investigated.* The results show that, the reactive power compensator as a prevalent electrical equipment in the power system has important influences on the PLC.

### Keywords

power line communication, reactive power compensator, high frequency model, MATLAB simulation, channel characteristics

### Recommended Citation

*Cao Wangbin, Yin Chengqun, Sun Limei, Li Xuecai.* Influence of Reactive Power Compensator on Power Line Communication Channel Characteristics[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 206-211.

## 无功补偿器装置对 PLC 信道特性影响的研究

曹旺斌, 尹成群, 孙利梅, 李雪彩

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 无功补偿器是电网中被广泛应用的重要设备。为研究无功补偿器对电力线通信的影响, 通过实际测量无功补偿器在 50 Hz~1 MHz 范围内的阻抗特性, 给出了宽频范围内无功补偿器阻抗变化的规律, 针对具体无功补偿器介质材料在高频时的特性进行分析, 建立了无功补偿器集总参数高频电路模型和基于端口行为的高频模型。利用传输线理论建立了电力线信道参数-确定性模型, 分析了无功补偿器对电力线通信信道传输特性以及容量的影响。结果表明, 无功补偿器作为电网中常用的电气设备, 对电力线通信有重要影响。

**关键词:** 电力线通信; 无功补偿器; 高频模型; MATLAB 仿真; 信道特性

中图分类号: TN 911.7; TM 74 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 01-0206-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701027

## Influence of Reactive Power Compensator on Power Line Communication Channel Characteristics

Cao Wangbin, Yin Chengqun, Sun Limei, Li Xuecai

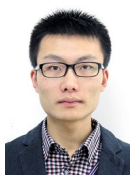
(School of Electrical &amp; Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Reactive power compensator is an important equipment which is widely used in power system. To study the influences of reactive power compensator on power line communication (PLC), the impedance characteristics of the reactive power compensator in the range of 50 Hz~1 MHz were measured, and the variation rule of the reactive power compensator impedance was proposed. The high frequency characteristics of dielectric materials in reactive power compensator were analyzed. And the high-frequency lumped parameter model and high-frequency two-port network model of reactive power compensator were proposed. The power line parameters-deterministic model was established based on the transmission line theory. The reactive power compensator effects on the transmission characteristics and capacity of PLC channel were further investigated. The results show that, the reactive power compensator as a prevalent electrical equipment in the power system has important influences on the PLC.

**Keywords:** power line communication; reactive power compensator; high frequency model; MATLAB simulation; channel characteristics

## 引言

电力线通信(Power Line Communication, PLC)



收稿日期: 2016-05-16 修回日期: 2016-08-17;  
基金项目: 国家自然科学基金(61172075), 中央高校  
基本科研业务费专项资金(2014XS78);  
作者简介: 曹旺斌(1989-), 男, 甘肃, 博士生, 研究  
方向为电力系统通信; 尹成群(1953-), 男, 河北, 教  
授, 博导, 研究方向为电气信息分析与处理技术、现  
代传感与测量技术。

是指将载有信息的载波信号加载到电流上利用电力线进行传输, 配合调制解调装置完成从发信端到收信端信息交换的过程<sup>[1-2]</sup>。但电力线不是专用通信信道, 信道阻抗特性相对复杂, 加上种类繁多的噪声, 导致载波信号在接入点上阻抗失配, 信号衰减大, 严重影响通信质量和稳定性<sup>[3-7]</sup>。研究 PLC 的信道阻抗特性对提高通信质量和稳定性具有重要意义。

<http://www.china-simulation.com>

无功补偿器是电网中大量存在的重要电气设备,通过无功补偿器对电力系统进行适当的无功补偿可保证电网的安全、稳定和经济运行<sup>[8-10]</sup>。虽然输电线路上的设备对 PLC 的信道特性影响明显,但针对特定设备对电力线通信信道特性影响的研究较少。文献[3]对中压电力线路上的变压器在 40~500 kHz 频率范围内进行了建模并对信道特性进行分析。文献[4-5]分别研究了 LED 灯和荧光灯对 PLC 通信的影响。文献[6]研究了医疗设备对 PLC 通信的影响。截止目前,对无功补偿器的研究大多关注的是电网能量的转换,很少涉及高频特性的研究。

本文以 WBMJ(Z)型自愈式低压并联电容无功补偿器作为研究对象,对无功补偿器在 50 Hz~1 MHz 频率范围内的阻抗特性进行了实际测量,分析了阻抗变化规律,给出了高频等效电路,建立了基于集总参数和端口行为的两种高频数学模型。分析了无功补偿器对电力线通信信道特性及信道容量的影响。

## 1 配电网无功补偿

### 1.1 电网无功补偿原理

电网的输出功率包括有功功率( $P$ )和无功功率( $Q$ )。无功功率不消耗电能,只是把电能转换为另一种形式的能量,但却是电气设备能够做功的必要条件。在电磁元件电路中有比例的安装电容元件,可使流过电感和电容的电流相互抵消,使电流矢量与电压矢量之间的夹角缩小以提高电能做功的能力<sup>[7]</sup>。无功补偿的方式因电气元件的不同而不同,中低压配电网中的电气元件多为电磁性元件,因此常用并联电容式无功补偿器对系统进行无功补偿。

### 1.2 常用的无功补偿装置

无功补偿技术发展迅速,无功补偿装置性能各有优缺点<sup>[10-11]</sup>,目前以静止无功补偿装置(SVC, Static Var Compensator)的应用最为广泛。SVC 又有多种形

式<sup>[12-13]</sup>。其中,晶闸管投切电容器(TSC, Thyristor Switched Capacitor)和晶闸管控制电抗器(TCR, Thyristor Controlled Reactor)因成本低,控制方式灵活,在电力系统中得到了广泛应用。

以河北沃邦电力公司生产的 WBMJ(Z)型自愈式低压并联电容无功补偿器作为研究对象。自愈式低压并联电容无功补偿器属于静止无功补偿器中的 TSC 型,三相电容无功补偿器采用星形接法,每一相分别串联一对反并联晶闸管作为控制开关。电网中,无功补偿器组会分成若干小组,晶闸管作为投切无功补偿的内部开关,根据负载感性无功功率的变化来切除或投入补偿器装置中的电容器组。

## 2 无功补偿器阻抗特性研究

### 2.1 无功补偿器的阻抗测量

本文用 Fluke 公司生产的 PM6036 RLC 电桥测量补偿器的阻抗。由于无功补偿器用补偿容量和额定电压来表征,测量前,根据式(1)计算出无功补偿的电容值以选择合适的测量方法和量程。

$$C_Y = \frac{Q}{3\omega U^2} = \frac{Q}{3 \times 2\pi f U^2} \quad (1)$$

式中: $Q$  为无功补偿器的容量; $U$  为额定电压; $f$  为工作频率。将补偿器参数  $Q = 10 \text{ k var}$ ,  $U = 250 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  带入公式(1)得  $C_Y = 169.77 \mu\text{F}$ 。

通过计算机控制仪器,设定采样间隔为 1 kHz,在 50 Hz~1 MHz 内测得 A, B, C 三相及 AB 相间、BC 相间、CA 相间的阻抗模值 $|Z_A|$ ,  $|Z_B|$ ,  $|Z_C|$ ,  $|Z_{AB}|$ ,  $|Z_{BC}|$ ,  $|Z_{CA}|$ 和阻抗角 $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$ ,  $\varphi_{AB}$ ,  $\varphi_{BC}$ ,  $\varphi_{CA}$ 。

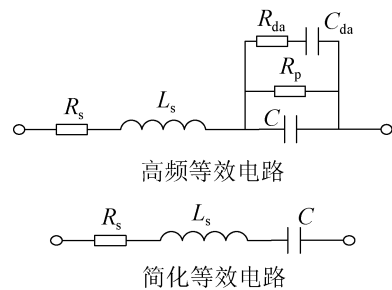
通过对测量结果可以看出, A 相与 B 相之间、B 相与 C 相之间、C 相与 A 相之间相互基本没有影响。A, B, C 三相阻抗具有相同的变化规律,且自谐振频率都在 19~23 kHz 之间,在自谐振频率之前,阻抗呈容性,阻抗幅值随频率的增加而减小。在自谐振频率之后,阻抗呈感性,阻抗幅值随频率的增加而增加。相位由 $-90^\circ$ 趋于 $90^\circ$ 变化。谐振频率点因装置不同而异,电力线作为载波通道时,载波频率应避开谐振区间,本文分析选取  $f \geq 30 \text{ kHz}$ 。

## 2.2 集总参数高频电路模型

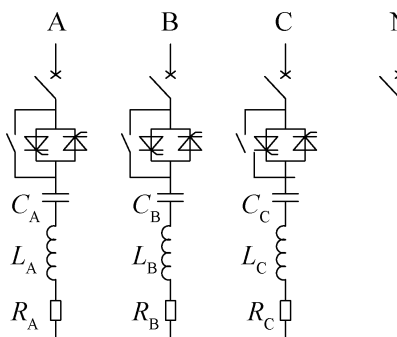
### 2.2.1 无功补偿器高频等效电路模型

WBMJ(Z)型自愈式低压并联无功补偿器以金属化聚丙烯膜材料为介质,这种介质材料的无功补偿器耐压和自愈能力较强,但随着频率的升高,补偿装置介质损耗角的正切值将大大增加,使高频损耗加重,绝缘电阻也大大下降,这时不能忽略寄生参数的影响<sup>[14]</sup>。寄生参数包括等效串联电阻  $R_s$  和等效串联电感  $L_s$  等。

图 1(a)上部分为三相补偿器中任意一相的高频等效电路,其中  $C$  为静电容,  $R_p$  为绝缘电阻,  $C_{da}$  和  $R_{da}$  分别为介质吸收电容和介质吸收电阻<sup>[15]</sup>。由于  $R_p$  通常很大( $G\Omega$ 级以上),相对于  $R_s$  和  $L_s$ ,在高频时其对补偿器的影响可以忽略。用  $R_s$  表示无功补偿装置在高频时的引线损耗,  $L_s$  表示在高频时的分布电感和极间电感。得到如图 1(a)下部分所示的串联 RLC 简化高频电路模型。图 1(b)所示为三相无功补偿器的集总参数电路高频模型。



(a) 电容式无功补偿装置高频等效电路



(b) 无功补偿器集总参数电路高频模型

图 1 无功补偿器集总参数电路高频建模

Fig.1 The high frequency lumped parameter modeling of reactive compensator

### 2.2.2 模型参数提取

本文通过最小二乘逼近来实现非线性曲线拟合。以式(2)作为最小二乘逼近数据拟合的目标方程<sup>[16]</sup>,通过选择适当的算法,找出使等式(2)成立的参数  $x$ 。

$$\min_x \|F(x, xdata)\|_2^2 = \min_x \sum_i (F(x, xdata_i) - ydata_i)^2 \quad (2)$$

对电路模型的阻抗幅值和阻抗角数据同时进行拟合,得到同时满足阻抗幅值和相位的  $R, L, C$  参数。计算图 1(b)电路模型的阻抗得到

$$Z = R + j(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}) \quad (3)$$

阻抗模值  $|Z|$  和阻抗角  $\varphi$  的计算分别如式(4)和式(5):

$$|Z| = \frac{\sqrt{16\pi^4 L^2 C^2 f^4 + 4\pi^2 (R^2 C^2 - 2LC) f^2 + 1}}{2\pi C f} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{4\pi^2 LC f^2 - 1}{2\pi RC f} \quad (5)$$

把式(4)和(5)作为拟合目标曲线,编写 MATLAB 程序导入实验测量的阻抗模值和阻抗角数据,根据对无功补偿器高频时的电气特性分析,估计一组用于算法迭代的参数初始值,进行数据拟合,可以得出式(4)和(5)中的参数  $R, L, C$ ,选择合适的初始值,得到一组较理想的拟合参数。

当激励信号频率变化范围较宽时(30 kHz~1 MHz),  $R, L, C$  表现的值也将发生变化,为了得到更好的拟合结果,通过对测量结果的观察,把频率分成 3 段(30 kHz~100 kHz, 101 kHz~300 kHz, 301 kHz~1 MHz)来进行数据拟合,以 A 相为例,最终拟合参数分别如表 1 所示。

表 1 拟合参数(A 相)

Tab.1 The fitting results (phase A)			
$f/\text{kHz}$	$L_A/\mu\text{H}$	$R_A/\text{m}\Omega$	$C_A/\mu\text{F}$
30~100	0.33	31.4	199.53
101~300	0.22	45.6	200
301~1 000	0.21	77.9	200

图 2 给出了 A 相阻抗的测量值与根据模型计算的阻抗值的比较。从图中可以看出, 阻抗模值和相位的仿真计算值与测量值基本吻合, 能够很好的模拟自谐振频率之前的阻抗容性特性和自谐振频率之后的阻抗感性特性。根据需要划分不同的拟合区段, 选择合适的初始参数, 可得到满意的拟合结果。

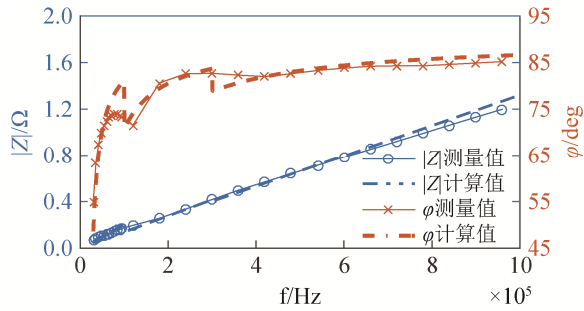


图 2 集总参数模型计算与测量结果对比(A 相)

Fig.2 Comparison of lumped parameter model calculation and measurement (phase A)

### 2.3 基于端口行为的高频模型

当不关注补偿器内部物理结构和材料性能时, 可以把自愈式无功补偿器的每一相看做一个无源端口网络来建立高频模型。无源端口网络阻抗是复数, 需对阻抗的实部(Re)和虚部(Im)分别进行拟合, 为获得理想拟合结果, 根据低压并联电容器在高频时的电器特性, 假设实部、虚部和频率( $f$ )之间的关系如式(6), (7)所示。

$$\operatorname{Re}(Z(f)) = \frac{a_1 f^2 + b_1}{c_1 f^2 + d_1} \quad (6)$$

$$\operatorname{Im}(Z(f)) = \frac{a_2 f^3 + b_2 f}{c f^2 + d_2} \quad (7)$$

以式(6), (7)为目标函数, 利用 1stOpt 提供的通用全局优化算法(Universal Global Optimization, UGO)进行计算, 分别得到  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$ ,  $a_2$ ,  $c_2$ ,  $d_2$  的最佳拟合值, 得到单相等效网络的策动点阻抗表达式:

$$Z(f) = \frac{a_1 f^2 + b_1}{c_1 f^2 + d_1} + j \frac{a_2 f^3 + b_2 f}{c f^2 + d_2} \quad (8)$$

把式(8)换算成  $Z(j\omega)$  的形式得到 A 相端口网络复频域等效网络阻抗:

$$Z_A(j\omega) = \frac{1.35 \times 10^{-12} (j\omega)^2 - 0.42\pi^2}{1.12 \times 10^{-11} (j\omega)^2 - 11.24\pi^2} + \frac{9.73 \times 10^{-17} (j\omega)^3 - 1.3 \times 10^{-5} \pi^2 (j\omega)}{1.566 \times 10^{-10} \pi (j\omega)^2 - 13.712\pi^3} \quad (9)$$

复频域导纳函数为:

$$Y(j\omega) = \frac{1}{Z(j\omega)} \quad (10)$$

令  $s = j\omega$ , 便可得到  $s$  域的网络阻抗函数  $Z(s)$  和导纳函数  $Y(s)$ 。仿真值与测量值的比较结果见图 3。

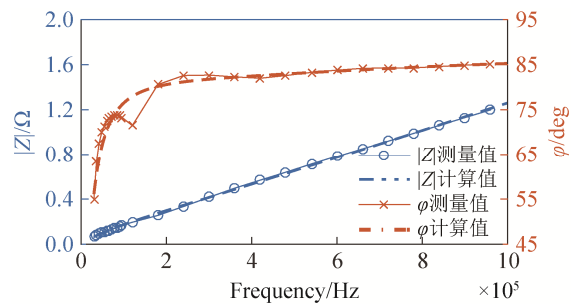


图 3 端口行为模型计算与测量结果对比(A 相)

Fig.3 Comparison of port behavior model calculation and measurement (phase A)

以上 2 种建模方法均能很好反映补偿器的阻抗变化规律。集总参数模型因通过分段拟合, 能较好反映物理性能引起的局部细节变化, 但过程较复杂, 基于端口行为的建模过程较前者简单, 但局部变化欠细。

## 3 对 PLC 信道特性的影响

### 3.1 电力线信道参数-确定性模型

传输线理论描述的是传输线中电磁波的传播, 信号通过传输线假设以横向电磁波(TEM)的形式进行传输<sup>[17-18]</sup>。双导体传输线单位长度等效模型如图 4 所示

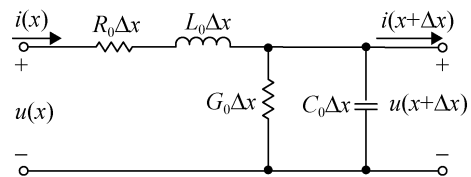


图 4 双导体传输线单位长度等效模型

Fig.4 Unit length equivalent model of two conductors transmission line

其中： $R_0, L_0, G_0, C_0$  分别为两导体中单位长度的电阻、电感、电导和电容，是传输线的一次参数，一般的电力线都可以看成是一次参数处处相等的均匀传输线。其特征阻抗  $Z_c$  和传输常数  $\gamma$  可分别表示为：

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (11)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (12)$$

式(11)(12)中， $\omega = 2\pi f$  是角频率， $\gamma$  的实部为衰减常数  $\alpha$ ，虚部则为相位偏移常数  $\beta$ ，分别代表信号的衰减和相位变化情况。

根据传输线理论，任意均匀传输线都可用一个二端口网络来表示，图 5 为电力线二端口网络与收发端连接框图。二端口网络的输入与输出的电流和电压之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中： $ABCD$  系数通常为关于频率  $f$  的复函数，用来表征二端口网络的电气特性。利用  $ABCD$  系数，可以得到负载电压与电源电压的比值，即二端口网络传递函数如(14)所示。双导体传输线的  $ABCD$  系数即信道的传输矩阵  $T$  如(15)所示。

$$H(f) = \frac{U_L}{U_s} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_s Z_L + DZ_s} \quad (14)$$

$$T = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中： $Z_s$  是电源阻抗； $Z_L$  是负载阻抗； $l$  为电线长度。

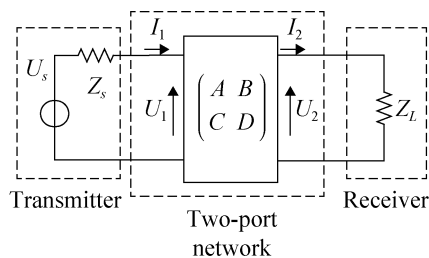


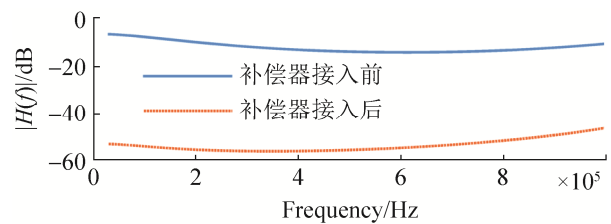
图 5 二端口网络与收发端相连的框图  
Fig.5 Block diagram of two port network connection

### 3.2 对 PLC 信道传输特性的影响

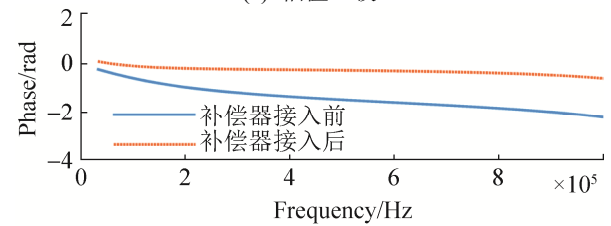
在图 5 所示的模型中，当无功补偿器(以 A 相为例)加入电网后等效负载阻抗为  $Z_L' = Z_L // Z_A$ ，显然信道阻抗变小。此时，端口网络传递函数变为：

$$H_I(f) = \frac{Z_L // Z_A}{A(Z_L // Z_A) + B + CZ_s(Z_L // Z_A) + DZ_s} \quad (16)$$

其中： $Z_A$  为 A 相无功补偿器随频率变化的阻抗值，利用 MATLAB 对无功补偿器投入前后传递函数进行对比，结果如下。



(a) 幅值比较



(b) 相位比较

图 6 无功补偿器对信道传输函数的影响  
( $l = 100 \text{ m}, Z_s = Z_L = 50 \Omega$ )

Fig.6 Influence of reactive compensator on channel transfer function

图 6(a)和(b)分别为电线长度  $l = 100 \text{ m}$  时信道的幅度和相位在加入无功补偿器前后的对比。从图中可以看出，当加入无功补偿器后信道的衰减加重、信道的相位变大。这是因为无功补偿器加入前  $Z_L$  的取值是阻抗匹配的最佳值，无功补偿器加入后负载阻抗的变化会引起电力线信道阻抗的变化，造成通信收发机输入阻抗和输出阻抗与信道阻抗不匹配。

### 3.3 对 PLC 信道容量的影响

信道容量代表信道的最大传输速率。单端口信道的信道容量的计算公式为：

$$C = \sum_{n=1}^N \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P_T(f) |h(f)|^2}{N_R(f)} \right) \text{ bit/sec} \quad (17)$$

其中:  $P_T(f)$  是信号的传输功率;  $N_R(f)$  是接收端的噪声;  $N$  是频率数;  $\Delta f$  是频率间隔;  $h(f)$  是信道转移函数。假定噪声为有色高斯噪声(Colored Gaussian Noise), 分别对加入无功补偿器前后的信道容量进行计算。图 7 给出了加入无功补偿器前后在信噪比 SNR 为 0~20 dB 时信道容量的变化。从图中可以看出加入无功补偿器后信道容量急剧变小, 信道性能明显下降。

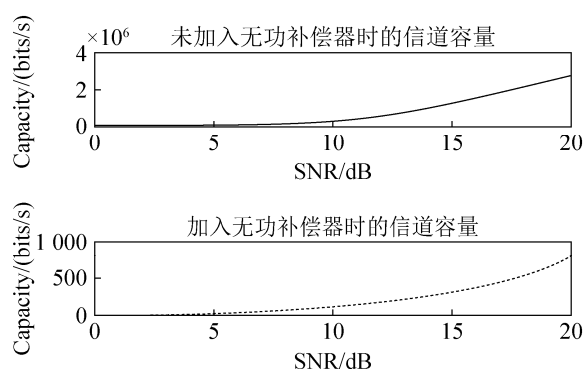


图 7 无功补偿器对信道容量的影响

Fig.7 Influence of reactive compensator on channel capacity

## 4 结论

基于实验测量数据, 本文得到了无功补偿器在高频环境下的阻抗变化规律, 提出了集总参数高频电路建模和基于端口行为的建模两种无功补偿器高频建模方法。利用传输线理论建立了电力线信道参数-确定性模型, 分析了无功补偿器对电力线信道传输函数以及信道容量的影响, 结果表明:

1) WBMJ(Z)型自愈式无功补偿器自谐振频率在 19~23 kHz 之间, 自谐振频率之前, 阻抗呈容性, 阻抗随频率的增加而减小。自谐振频率之后, 阻抗呈感性, 阻抗随频率的增加而增加。电力线作为载波通道时, 载波频率应避开谐振区间。

2) 集总参数模型能较好反映物理性能引起的局部细节变化, 但建模过程较复杂, 基于端口行为的建模过程较前者简单, 但局部变化欠细。实际应用中应根据需要选择不同模型。

3) 无功补偿器加入电网后, PLC 信道的衰减加重、信道的相位变大, 原有的阻抗匹配状态失衡。PLC 的信道容量急剧变小, 信道性能明显下降。在设计 PLC 通信系统时, 应充分考虑输电线路路上无功补偿器的安装和使用情况, 设计合理的阻抗匹配方案以提高 PLC 通信质量。

## 参考文献:

- [1] 叶君, 孙洪亮, 王毅, 等. 一种适用于低压电力线通信信道的背景噪声建模方法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(6): 722-727. (YE Jun, SUN Hongliang, WANG Yi, et al. Modeling method of background noise in power line communication channel [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2015, 27(6): 722-727.)
- [2] 杨航, 茹乐, 杜兴民, 等. 一种新的 LV-BPL 宽带通信系统仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3327-3330. (Yang Hang, Ru Le, Du Xingmin, et al. Simulation of Digital Fountain Concatenated Coding Wavelet -Packet-Based Broadband System in LV-BPL [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(14): 3327-3330.)
- [3] 郭以贺, 谢志远, 石新春. 基于多导体传输线的中压电力线通信信道建模 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1183-1190. (GUO Yihe, XIE Zhiyuan, SHI Xinchun. Modeling of Medium Voltage Power Line Communication Channel Based on Multi-conductor Lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1183-1190.)
- [4] De Beer A S, Emleh A, Ferreira H C, et al. Effects of LED lamps on the power-line communications channel [C]// ISPLC 2013. USA: IEEE, 2013: 209-213.
- [5] Emleh A, De Beer A S, Ferreira H C, et al. The impact of the CFL lamps on the power-line communications channel [C]// ISPLC 2013. USA: IEEE, 2013: 225-229.
- [6] Shinbo T, Miyazaki S, Hirose M, et al. Effects of Power Line Communication System on Medical Equipments [C]// IUPESM 2009. Germany: Springer, 2009: 547-549.
- [7] 郭昊坤, 吴军基, 陆嫻, 等. 电力线通信信道噪声模型研究现状 [J]. 电力系统通信, 2011, 32(8): 1-3. (GUO Hao-kun, WU Jun-ji, LU Xian, et al. Research on Channel Noise Model of Power Line Communication [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(8): 1-3.)
- [8] 李文强, 黄刚, 杨录. 大量程全自动阻抗测量仪研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 859-865. (Li Wenqiang, Huang Gang, Yang Lu. New study on wide-range and automatic impedance measuring instrument [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 859-865.)

(下转第 225 页)