

双向工频通信下行信号系统的准最优控制方法

全玉生¹, 刘赫¹, 李文¹, 李建歧², 张学东³, 彭晓洁³, 劳国强³

- (1. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 东北电网有限公司, 辽宁省 沈阳市 110006)

Method of Suboptimal Control for Two-way Power Frequency Automatic Communication System Inbounds Signal

QUAN Yu-sheng¹, LIU He¹, LI Wen¹, LI Jian-qi², ZHANG Xue-dong³, PENG Xiao-jie³, LAO Guo-qiang³

- (1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
3. Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: The characteristics of the two way power frequency automatic communication system (TWACS) inbound signal system are decided by the characteristics of modulation loop, distribution transformer and lines. This paper proposed the coordination between different effective frequency bandwidths by comparing to the frequency characteristic of modulation loop and transmission channel. The phase-frequency characteristics of transmission channel play the decisive role in this system. The regulation method which adds series-resistance and RC series circuit to modulation loop is proposed. The selected formula for the resistance of first-order system, and for the resistance and the capacitor of the second-order system are given. The suboptimal controlling method which meets the requirement of IEEE transient power quality is given.

KEY WORDS: two way power frequency automatic communication system (TWACS); transmission characteristic; amplitude-frequency characteristic; phase-frequency characteristic; suboptimal control

摘要: 双向工频通信系统(two way power frequency automatic communication system, TWACS)下行信号系统的特性由调制信号特性、配电变压器的传输特性和线路的传输特性决定, 通过下行调制回路和传输通道幅频特性、相频特性的分析对比, 提出各频率特性有效频带的协调配合问题, 传输通道的相频特性起决定性作用。推导出在下行调制回路中串入电阻和串入阻容串联电路的调控方法。给出1阶系统电阻的选取公式和2阶系统电阻及电容的选取公式。在满足IEEE暂态电能质量条件下, 实现下行信号系统准最优控制。

关键词: 双向工频通信; 传输特性; 幅频特性; 相频特性; 准最优控制

0 引言

双向工频通信系统(two way power frequency automatic communication system, TWACS)是以配电网为物理媒质的通信系统, 是一种近年来在国外出现的新型电力配电网双向数字通信技术^[1-2], 其成本低廉, 抗干扰能力强^[3-5], 可以直接进行跨变压器台区通信^[6-7], 这是传统电力载波通信无法比拟的^[8], 因此这种技术具有广阔的应用前景^[9-10]。而中国配电网与国外不同, 噪声干扰大^[11-12]、多出线多分支结构、中性点不接地或经消弧线圈接地方式^[13-14], 使得中国双向工频通信的模型与国外有很大的差别。

双向工频通信下行信号系统包括下行信号调制回路和传输通道。中国的下行信号调制回路为变电站所用变或调制变处的复合序网, 下行信号传输通道为多出线、多段、多分支结构的配电网和配电变压器; 双向工频通信原理是利用工频电压过零附近的波形畸变传输信息, 输出通道利用2个相邻电压波形来表示1位信息^[15], 输入通道利用4个电流周期波形表示1位信息^[16], 因此, 下行信号系统必须满足IEC暂态电磁兼容标准。下行信号系统调制信号、配电变压器的传输特性、线路的传输特性和暂态电能质量标准协调一致, 是下行信号系统必须解决的问题, 因此, 本文提出并研究双向工频通信下行信号系统的准最优控制。所谓准最优控制,

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGKJ[2007]111)。

The Key Science and Technology Program of State Grid (SGKJ[2007]111).

实际上就是在兼顾暂态电能质量标准、配电变压器的频率特性和线路的频率特性下，在下行信号调制回路中增加一些控制元件，使得调制信号的幅频相频特性处于信号传输通道的有效频带(衰减较小、相移较小)。

1 下行调制信号的频率特性

中国配网可控硅处的序网和复合序网分析表明，中国配网下行调制回路可以简化为 1 阶系统，如图 1 所示。

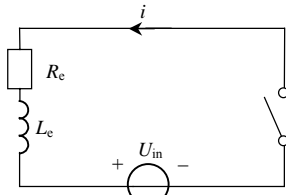


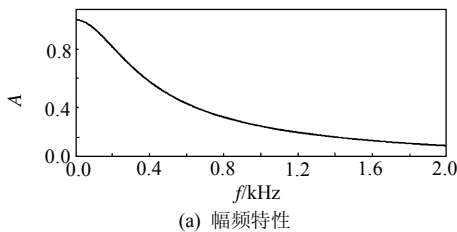
图 1 下行调制回路的 1 阶等效电路
Fig. 1 First order equivalent circuit of inbound modulation loop

图 1 中

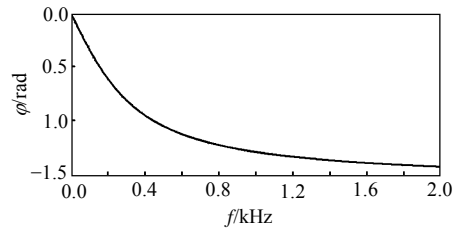
$$R_c = \frac{2(L_{T1}^2 R + L^2 R_{T1})}{(L_{T1} + L)^2} + \frac{L_{T0}^2 R + L^2 R_{T0}}{(L_{T0} + L)^2} + R_c \quad (1)$$

$$L_c = 2L_{T1}L/(L_{T1} + L) + L_{T0}L/(L_{T0} + L) \quad (2)$$

式中 R_{T1} , L_{T1} , R_{T0} , L_{T0} , R , L , R_c 分别为所用变压器的正序电阻和电感、零序电阻和电感、负载的电阻和电感及开关的接触电阻。所用变压器容量为 315kVA 时，下行调制回路电流的频率特性如图 2 所示，图中 A 为归一化幅值， φ 为相位。



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 2 下行调制回路电流的幅频相频特性

Fig. 2 Amplitude and phase frequency characteristic of current for inbound modulation loop

2 下行调制信号线路传输通道的频率特性

下行信号的传输通道之一是多段、多分支结构的配电网。下文以典型参数实例的方式研究不同负荷下各分支段的传输特性。某 3 段分支线路的示意图如图 3 所示，其参数如表 1 所示。对峰、腰、谷负荷，各分支负载的功率因数取为 $\cos \varphi = 0.75$ (感性)，峰负荷 $k_f = 1$ ，腰负荷 $k_f = 0.5$ ，谷负荷 $k_f = 0.1$ 或 0.05，图 3 的等效电路如图 4 所示。

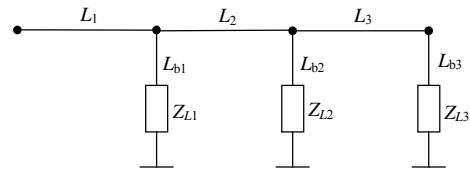


图 3 3 段分支线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three branches

表 1 3 段分支线路参数(某配电网的实际参数)

Tab. 1 Parameters of three branches(actual parameters of distribution network)

线路	I_{max}/A	长度/km	电阻/ (Ω/km)	电感/(mH/km)	电容/ $(\mu F/km)$
L_1	400	8	2.18	4.22	0.03
L_2	300	10	2.90	4.20	0.03
L_3	100	6	3.50	4.00	0.03
L_{b1}	100	5	3.50	4.00	0.03
L_{b2}	200	4	4.36	4.05	0.03

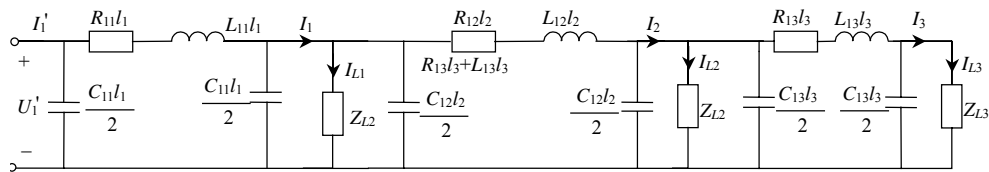


图 4 3 段分支线路等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of three branches

$$Z_{L1} = (43.3 + 0.115s) / k_f \quad (3)$$

$$Z_{L2} = (21.7 + 0.057s) / k_f \quad (4)$$

$$Z_{L3} = (43.3 + 0.115s) / k_f \quad (5)$$

图 5 为第 3 线段的输出电压和电流与母线的输出电压和电流比值的幅频特性。配电网高压母线出

线多和补偿电容大造成了母线处的等效阻抗很小，因而每回出线的分流很小，几乎为零，因此图 5 中电流的对应曲线很低。从图 5 可以看出，下行传输通道对负载的峰、腰、谷变化趋势一致。在 200~700 Hz 频段范围内：低频衰减大，高频衰减小；谷

最大,腰次之,峰最小。在 200~700 Hz 频段内,最小电压不小于输入电压的 50%。从图 6 的相频特性可以看出,在 100~700 Hz 频段内,传输通道的相移很小,这对下行信号的检波十分有力,但当频率大于 900 Hz 时,传输通道的相移大于 150°(即 5π/6)。由于双向工频通信的特殊检波方式的要求,下行信号传输通道的相频特性比幅频特性更重要,一般只能首选相频特性的相移较小的特征频带,仅能以其为基准,很难对其进行控制或补偿。

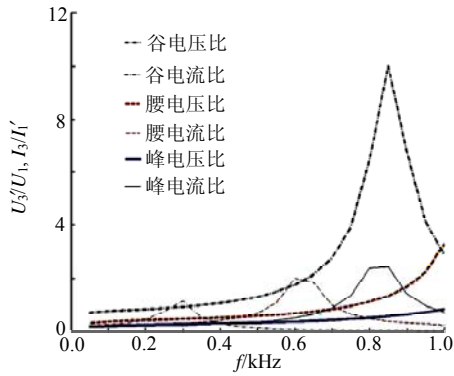


图 5 \dot{U}_3/\dot{U}_1 和 \dot{I}_3/\dot{I}_1 的幅频特性

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic of \dot{U}_3/\dot{U}_1 and \dot{I}_3/\dot{I}_1

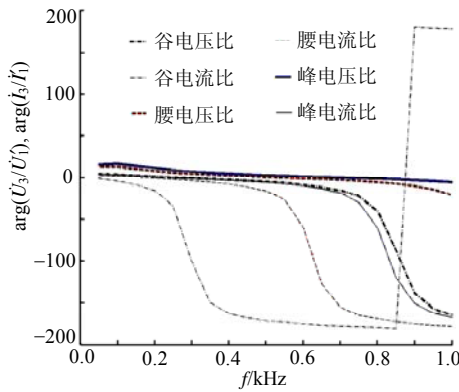


图 6 \dot{U}_3/\dot{U}_1 和 \dot{I}_3/\dot{I}_1 的相频特性

Fig. 6 Phase-frequency characteristic of \dot{U}_3/\dot{U}_1 and \dot{I}_3/\dot{I}_1

3 下行调制信号的准最优控制

下行信号的传输通道线路和配电变压器的频率特性,特别是相频特性制约着下行信号的工作频率,从第 2 节各频率特性可知,下行信号的工作频率在 300~800 Hz 较为合理。本文把下行信号传输通道频率特性衰减较小、相移较小的频带定义为有效频带。在这一频带范围内,对下行调制回路实施控制,使其暂态电压电流的时间和幅值满足电能质量的标准。

暂态电能质量问题是稳态电能质量问题的延

伸,它的研究起步较晚,国内刚刚有所认识。暂态电能质量问题其实质就是暂态电压质量问题,其主要性能指标包括电压脉冲、浪涌、电压跌落及瞬时电压中断等,目前国内外还没有统一标准,但一般采用其指标参数的幅值和持续时间来描述(有时考虑其上升下降率、发生频率等)。本文采用 IEEE Std 519—1992(IEEE Std 519—1981 的修订版,2004 年 6 月 15 日第 2 次印刷) IEEE 推荐的“电力系统谐波控制惯例和要求”10.3 中规定的整流凹陷的凹陷面积限制标准,即 $A_N = \int_0^{\Delta t} \Delta u(t) dt$, $\mu s \cdot V$ 。

1) 对于特殊用户,如医院和机场等场所, $A_N = \frac{16\,400}{480} \mu s \times 380\,V = 12\,988.3 \mu s \cdot V$, 本文称之为标准①;

2) 对于一般系统, $A_N = \frac{22\,800}{480} \mu s \times 380\,V = 18\,050 \mu s \cdot V$, 本文称之为标准②;

3) 对于专用系统 $A_N = \frac{36\,500}{480} \mu s \times 380\,V = 28\,895.3 \mu s \cdot V$, 本文称之为标准③。

本文根据 IEEE Std 519—1992 的暂态电压凹陷面积的限制范围,研究下行调制信号系统的准最优控制方法和方案。

1) 调制回路串入一个电阻。

设在下行信号调制回路中串入一个调节电阻 R_s , 如图 7 所示,其电路方程为

$$iR + L \frac{di}{dt} = -u_{in} \quad (6)$$

式中: $R \triangleq R_c + R_s = kR_c$; $L \triangleq L_c$ 。求解方程(6),可得

$$i(t) = i_h(t) + i_p(t) \quad (7)$$

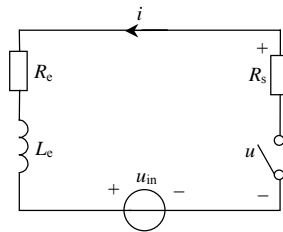


图 7 下行调制回路串入电阻的电路

Fig. 7 Series resistance circuits of inbound modulation loop

取 $\dot{U}_{in} = \dot{U}_1/n = 220 \angle (17\pi/12) V$, 则

$$u(t) = -(k-1)R_c i(t) \quad (8)$$

$$\Delta u(t) = u_{in} - u(t) \quad (9)$$

$$\omega t \in [0, \pi/12], A_N = \int_0^{1/1200} \Delta u(t) dt \quad (10)$$

从图 8~10 可以看出，不加或加 1 个小电阻 ($k=1.1$)，在 200~400 Hz 范围内可以满足要求，但调控范围很小，抗干扰能力差。

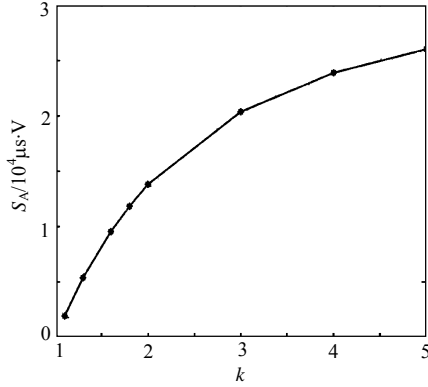


图 8 不同系数 k 时短时电压凹陷面积
Fig. 8 Different coefficient k of short-duration voltage-sag area

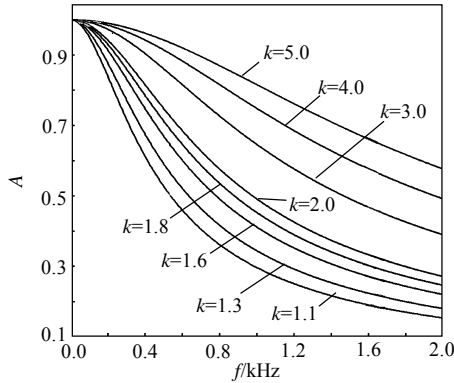


图 9 $i(t)$ 自由分量的幅频特性
Fig. 9 Amplitude-frequency characteristics of the free components of $i(t)$

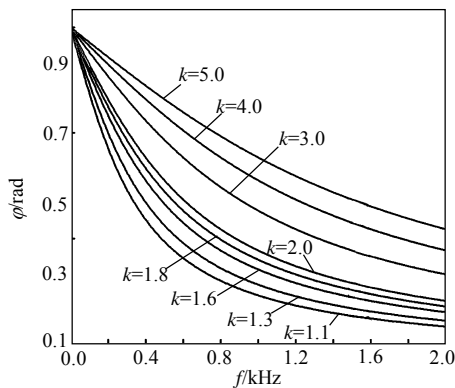


图 10 $i(t)$ 自由分量的相频特性
Fig. 10 Phase-frequency characteristics of the free components of $i(t)$

2) 调制回路串入 1 个电阻和 1 个电容。
如图 11 所示，图中电路方程为

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = -\frac{1}{LC} u_{in} \quad (11)$$

式中： $R \triangleq R_c + R_s = k_1 R_c$ ； $L \triangleq L_c$ (k_1 取 1, 2.0)； $u_{in} = u_1 / n = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t + 4\pi/3) \text{ V}$ 。

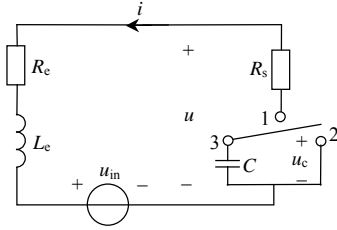


图 11 下行调制回路串入电阻和电容的电路
Fig. 11 Series resistance and capacitor circuit of inbound modulation loop

图 11 的网络为 2 阶系统，2 阶系统临界阻尼上升最快，但考虑到实际参数的变化很难保证恰好满足临界阻尼条件，因此，分别讨论过阻尼和欠阻尼的调控效果。

①过阻尼。

式 (11) 的特征根为 $p_{1,2} = -R/(2L) \pm \sqrt{[R/(2L)]^2 - (1/\sqrt{LC})^2}$ ，令 $\delta = R/(2L)$ ， $\omega_d = 1/\sqrt{LC}$ ，则

$$\sqrt{[R/(2L)]^2 - (1/\sqrt{LC})^2} \triangleq [kR/(2L)] \quad (12)$$

$$p_{1,2} = -\delta \pm k\delta \quad (13)$$

则

$$C = 1/[\delta^2 L(1-k^2)] \quad (14)$$

将 k 分别取 0.001, 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.98 进行研究对比。

由 $i(t)$ 和 $u_c(t)$ 可求得

$$u(t) = -(k_1 - 1)R_c i(t) + u_c(t) \quad (15)$$

其解的过程如串入 1 个电阻的电路一样，此处不再叙述，图 12~13 分别为不同 k_1 时的短时电压凹陷面积。

自由分量为

$$i_h(t) = -C[\delta(1-k)A_1 e^{-\delta(1-k_1)t} + \delta(1-k)A_2 e^{-\delta(1-k_1)t}] \quad (16)$$

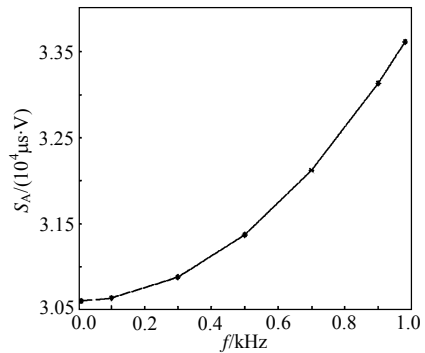


图 12 $k_1=1.0$ 时短时电压凹陷面积
Fig. 12 Short duration voltage sag area when $k_1=1.0$

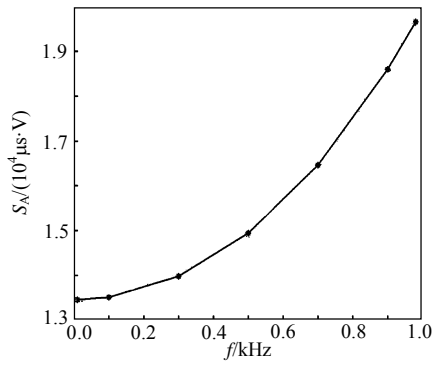


图 13 $k_1=2.0$ 时短时电压凹陷面积

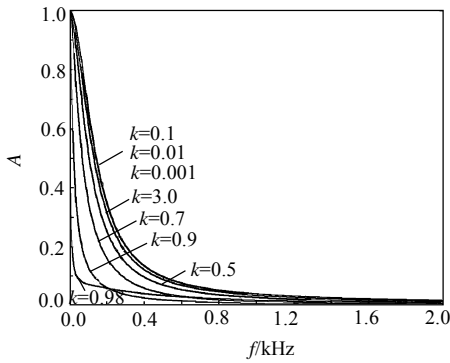
Fig. 13 Short duration voltage sag area when $k_1=2.0$

调制信息由自由分量携带, 对 $i_h(t)$ 进行傅氏变换:

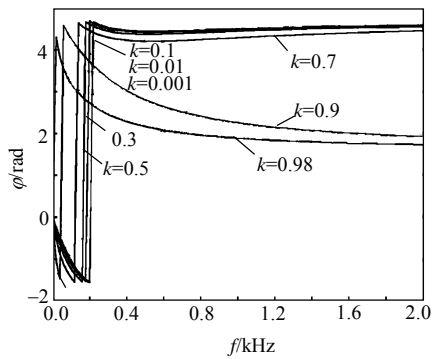
$$|I_h(j\omega)| = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (17)$$

$I_A > 0$ 时, $\varphi = \arctan(I_B/I_A)$; $I_A < 0$ 时, $\varphi = \pi + \arctan(I_B/I_A)$; $I_A = 0$ 且 $I_B > 0$ 时, $\varphi = \pi/2$; $I_A = 0$ 且 $I_B < 0$ 时, $\varphi = 3\pi/2$.

图 14~15 分别为 $k_1=1.0$ 和 $k_1=2.0$ 时 $i(t)$ 的自由分量的幅频特性曲线与相频特性曲线。从图 14~15 可以看出过阻尼 2 阶控制系统不能满足 IEEE 标准 1。



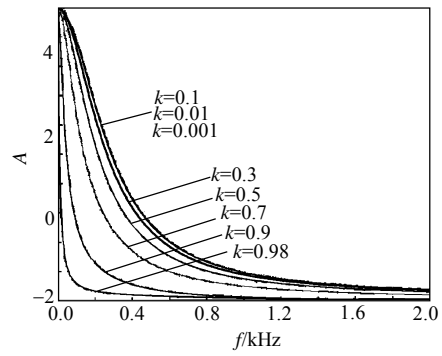
(a) 幅频特性



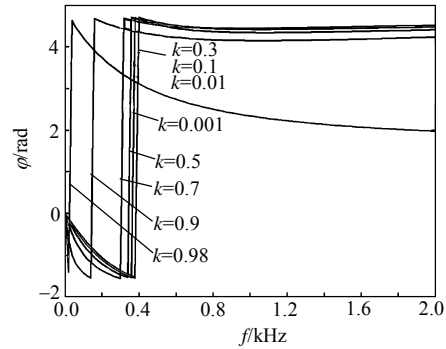
(b) 相频特性

图 14 $k_1=1.0$ 时 $i(t)$ 自由分量的幅频相频特性

Fig. 14 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of free component for $i(t)$ when $k_1=1.0$



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 15 $k_1=2.0$ 时 $i(t)$ 自由分量的幅频相频特性

Fig. 15 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of free component for $i(t)$ when $k_1=2.0$

②欠阻尼。

式 (11) 的特征根为 $p_{1,2} = -R/(2L) \pm j\sqrt{(1/\sqrt{LC})^2 - [R/(2L)]^2}$, 令 $\delta = R/(2L)$, $\omega_d = 1/\sqrt{LC}$, $\sqrt{(1/\sqrt{LC})^2 - (R/2L)^2} \triangleq (kR/2L)$,

$$p_{1,2} = -\delta \pm jk\delta \quad (18)$$

则

$$C = 1/[\delta^2 L(1+k^2)] \quad (19)$$

本文取 k 为 0.001, 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.98 进行研究对比。2 阶方程的求解过程与过阻尼情况相同, 这里不再阐述。图 16~17 分别为 $k_1=1.0$ 和 $k_1=2.0$ 时的短时电压凹陷面积。

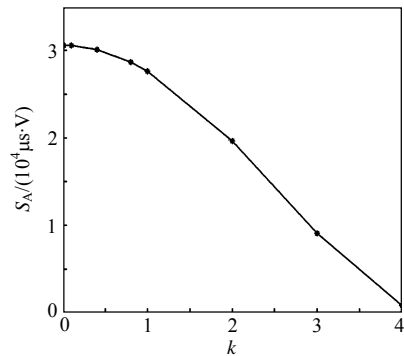


图 16 $k_1=1.0$ 时短时电压凹陷面积

Fig. 16 Short duration voltage sag area when $k_1=1.0$

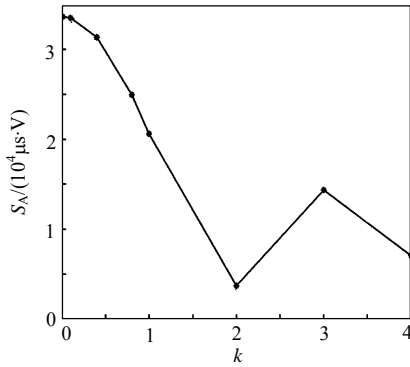


图 17 $k_1=2.0$ 时短时电压凹陷面积

Fig. 17 Short duration voltage sag area when $k_1=2.0$

响应的自由分量为

$$i_h(t) = -C[A\delta e^{-\delta t} \cos(k\delta t + \psi) + Ak\delta e^{-\delta t} \sin(k\delta t + \psi)] \quad (20)$$

对 $i_h(t)$ 进行傅氏变换，则有

$$I_h(j\omega) = -\frac{A}{2\delta L(1-k^2)} \cdot \left(\frac{(1-jk)e^{j\psi}}{\delta + j(\omega - k\delta)} + \frac{(1+jk)e^{-j\psi}}{\delta + j(\omega + k\delta)} \right) \triangleq I_A + jI_B$$

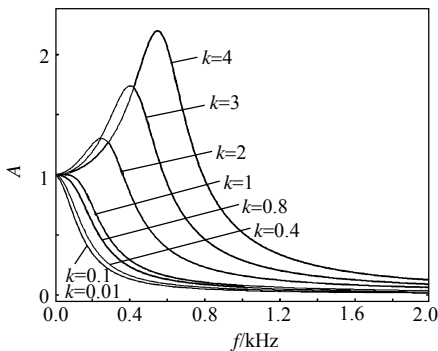
$$I_h(j\omega) = I_A + jI_B \quad (21)$$

$$|I_h(j\omega)| = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (22)$$

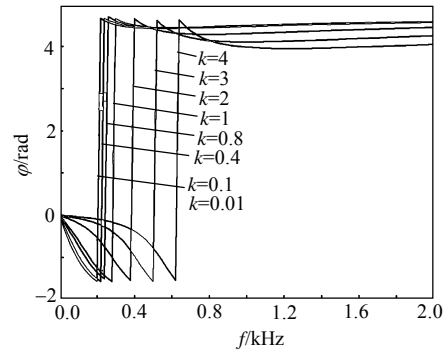
对电流 I_A 、 I_B 和 φ 的讨论与过阻尼情况相同，不再详述。

图 18~19 分别为 $k_1=1.0$ 和 $k_1=2.0$ 时 $i(t)$ 的自由分量的幅频与相频特性曲线。

由图 16~17 和图 18~19 可知：欠阻尼的调控效果较好； $R \triangleq R_c + R_s = k_1 R_c$ ， $1/(LC) = (1+k^2) \cdot [R/(2L)]^2$ ， k_1 和 k 的值越大效果越好。因此，本文提出在满足 IEEE 暂态电能质量标准的条件下，以调制回路电流幅值较大和电流上升速率较大作为选取 R_s 和 C 的标准，实现下行信号的准最优控制。对图 11 所示的调制回路，取 $k_1=2$ ， $k=3.5$ 时效果较好。



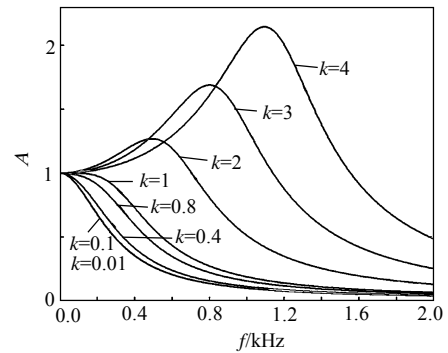
(a) 幅频特性



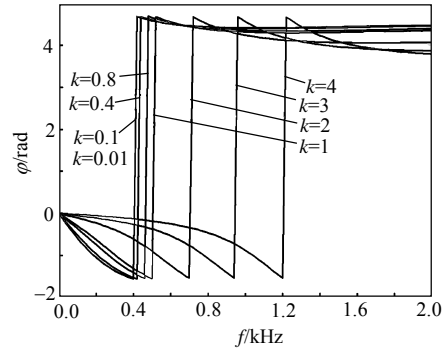
(b) 相频特性

图 18 $k_1=1.0$ 时 $i(t)$ 自由分量的幅频特性

Fig. 18 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of free component for $i(t)$ when $k_1=1.0$



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 19 $k_1=2.0$ 时 $i(t)$ 自由分量的幅频特性

Fig. 19 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of free component for $i(t)$ when $k_1=2.0$

4 仿真分析

本文采用 EMTP 进行仿真。仿真模型为 220 kV 系统，由输电线路、配电线路、低压线路、输电变压器、配电变压器、调制变压器构成，输电变压器容量为 90 MVA，变比为 220 kV/10.5 kV，Yn/D11 连接组别，配电变压器和调制变压器容量为 0.315 MVA，变比为 10.5 kV/0.4 kV，Y/yn0 连接组别。采用表 1 的某实际线路参数，仿真电路如图 20 所示。

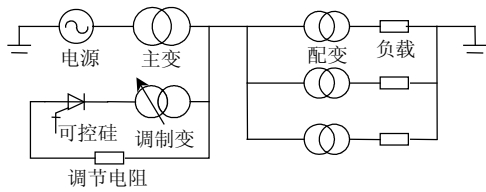


图 20 仿真电路

Fig. 20 Simulation loop

1) 调节阻抗为零的情况, 在 C 相第 1 个电压过零前进行 1 次调制, 线路的电压波形如图 21 所示。

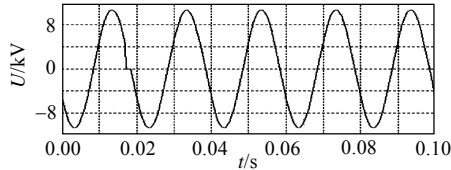
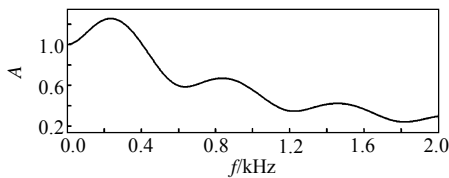


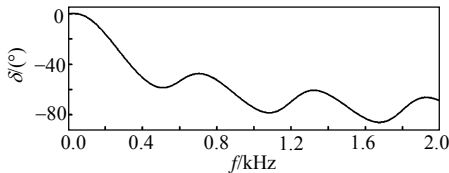
图 21 配电线路电压波形

Fig. 21 Voltage waveforms of distribution line

线路电流的幅频相频特性如图 22 所示。



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 22 调节阻抗为 0 时电流的幅频相频特性

Fig. 22 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of current when the regulation resistance is 0

可见, 虽然在 200~400 Hz 范围内满足要求, 但是调控范围太窄, 抗干扰能力不强。

2) 为了弥补这一不足, 加入调节阻抗, 采用上文中的调节阻抗选取公式, $R \triangleq R_c + R_s = k_1 R_c$, $1/(LC) = (1+k^2)[R/(2L)]^2$, 取 $k_1 = 2$, $k = 3.5$, 在电压过零前调制, 其调制电压波形如图 23 所示。线路电流的幅频相频特性如图 24 所示。

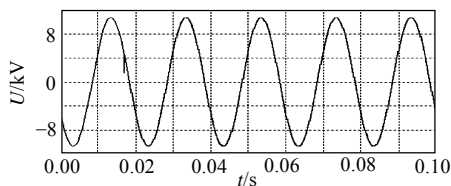
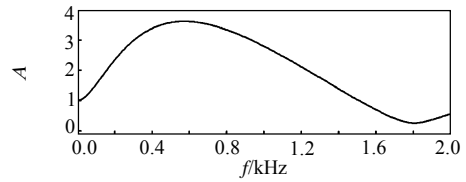
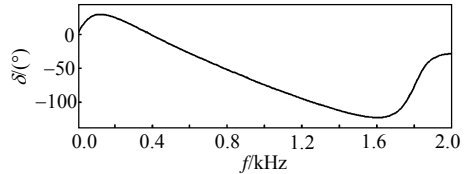


图 23 串联调节阻抗的配电线路电压波形

Fig. 23 Voltage waveforms of distribution line with series regulation resistance



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 24 有调节阻抗时电流的幅频相频特性

Fig. 24 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of current with series regulation resistance

从图 23 可看出, 加入调节电阻之后, 电压畸变所携带的信息明显, 抗干扰能力明显加强。图 24 表明有效频带增宽, 在 200~1 000 Hz 范围内, 都满足 IEEE 标准, 这与上文理论分析的结果一致, 本文建议根据不同的用户类型选取不同的调控参数, 以获得准最优的整体性能和经济效益。

5 结论

本文以中国配电网的典型参数为例, 分析研究了双向工频通信下行信号系统的准最优控制, 总结本文的工作, 有以下结论:

1) 通过对双向工频通信调制回路和传输通道幅频相频特性特别是相频特性的研究, 提出各频率特性有效频带的协调配合问题, 指出传输通道的相频特性起决定性作用, 给出了中国配电网典型参数下行信号系统的有效频带中心频率约为 500 Hz。

2) 根据 IEEE 推荐的暂态电能质量标准, 提出了双向工频通信的准最优控制问题。提出了在下行调制回路中串入电阻和串入电阻、电容串联电路的控制方法, 给出了 1 阶系统电阻的选取公式和 2 阶系统电阻和电容的选取公式。本文典型参数下行调制回路的 1 阶控制系统中, 基本不能满足 IEEE 标准①; 过阻尼 2 阶控制系统中, 不能满足 IEEE 标准①; 欠阻尼 2 阶控制系统中, 大部分可以满足 IEEE 标准①, 当 $k_1 = 2$ 时, 2 阶欠阻尼系统几乎全部满足 IEEE 标准①, 而且 $R \triangleq R_c + R_s = k_1 R_c$, $1/(LC) = (1+k^2)[R/(2L)]^2$, k_1 和 k 的值越大效果越好。下行信号 1 阶调控系统实现简单, 但调控效果和范围小; 2 阶系统实现较简单, 但调控范围大、效果好, 有

较大的选择余地。

3) 在满足 IEEE 暂态电能质量的条件下, 以调制回路电流较大和电流上升速率较大为标准, 实现下行信号系统的准最优控制。

双向工频通信原理是利用工频电压过零点附近的波形畸变传输信息, 因此, 下行信号系统必须满足暂态电能质量标准。这是该技术应用于配电网必须要解决的问题。

参考文献

- [1] Mak S T. Power frequency communication on long feeders and high levels of harmonic distortion[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(4): 1731-1736.
- [2] 张世平, 周庆东, 张绍卿. 基于时域分析的工频通信信号特征提取[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 85-89.
Zhang Shiping, Zhou Qingdong, Zhang Shaoqing. Features extraction of TWACS signal based on time-frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 85-89(in Chinese).
- [3] 周世伟, 张绍卿. 配电网双向工频通信的原理与实现[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 37-38.
Zhou Shiwei, Zhang Shaoqing. Realization of two way fundamental frequency communication for power distribution networks[J]. Power System Technology, 1999, 23(10): 37-38(in Chinese).
- [4] 张世平, 张绍卿, 刘瑞叶. 双向工频通信信号在配电网中的传输特性[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 63-66.
Zhang Shiping, Zhang Shaoqing, Liu Ruiye. Two-way power frequency automatic communication system(TWACS) signal transmission characteristic analysis on power distribution network [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 63-66(in Chinese).
- [5] 张世平, 赵永平, 刘瑞叶, 等. 用基于全通滤波器的 IIR 陷波器抑制工频通信中的谐波干扰[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 35-38.
Zhang Shiping, Zhao Yongping, Liu Ruiye, et al. Rejecting harmonic interference in TWACS using IIR notch filter based on all-pass filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 35-38(in Chinese).
- [6] Mak S T. TWACS, a power line communication technology for power distribution network control and monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986, 1(1): 66-71.
- [7] 王静, 刘涤尘, 彭希. 基于差分技术的双向工频通信信号提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(6): 18-21.
Wang Jing, Liu Dichen, Peng Xi. Signal extraction of two way automatic communication system based on differential technique [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(6): 18-21(in Chinese).
- [8] Mak S T. Power delivery infrastructure differences and their impact on different types of power line communications for automatic meter reading[C]. The 16th Inter-national Conference and Exhibition on Electricity Distribution, London, 2001.
- [9] 周世伟, 张绍卿, 洪文学. 双向工频通信信号的特征提取与模糊分类方法 [J]. 电网技术, 1999, 23(7): 49-52.
Zhou Shiwei, Zhang Shaoqing, Hong Wenxue. Feature extraction and fuzzy classification method for two way automatic communication systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 49-52(in Chinese).
- [10] 赵永平. 基于电力配电网的双向工频自动通信技术[J]. 电测与仪表, 2003, 40(9): 47-49.
Zhao Yongping. Two way automatic communication system for the power distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(9): 47-49(in Chinese).
- [11] 王兆安. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 34-36.
Wang Zhaoan. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 34-36(in Chinese).
- [12] 嫣素云, 王毅. 双向工频通信的信号传输特性分析[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(5): 103-106.
Yan Suyun, Wang Yi. Analysis of signal transmission in TWACS [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(5): 103-106(in Chinese).
- [13] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 电机工程学报, 2004, 24(6): 54-58.
Wang Yaonan, Huo Bailin, Wang Hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58(in Chinese).
- [14] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.
Su Zhantao, Lü Yanping. A new wavelet packet analysis based method to detect faulty line for single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding [J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33(in Chinese).
- [15] Mak S T. New method of generating TWACS type outbound signals for communication on power distribution network[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8): 2134-2140.
- [16] Mak S T, Thomas G, Moore J. TWACS, a new viable two-way automatic communication system for distribution network, part II: inbound communications[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8): 2141-2147.



金玉生

收稿日期: 2010-02-26。

作者简介:

金玉生(1955—), 男, 教授, 1999年10月毕业于西安交通大学电气工程(高电压技术)专业(博士)。研究方向为电力系统分析与控制和高电压电气设备故障检测与诊断技术。qysh@vip.163.com;

刘赫(1984—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术, liuhe1984@ncepu.edu.cn;

李文(1982—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术;

李建岐(1969—), 男, 高级工程师, 从事电力系统通信与电力自动化的研究开发工作。

(责任编辑 刘浩芳)