

# Trabajo sobre el estudio de tensiones transitorias de restablecimiento (TTR)

## APARTADO 1

En el sistema representado en la figura 1 se ha producido una falta trifásica en el punto LX (en bornes del interruptor S). De acuerdo con los estudiado en el capítulo de tensiones transitorias de restablecimiento, con el empleo de un modelo monofásico del sistema, se pide:

- Determinar la expresión analítica de la TTR, así como la representación gráfica de la misma, tomando como origen de tiempos el instante en el que se apaga el arco eléctrico.

Partimos de la expresión general:

$$u_{TTR}(t) = u_{\infty}(t) + A \cos w_1 t + B \cos w_1 t$$

de donde:

$$\begin{aligned} u_{\infty} &= A \cos wt \quad (= U_s); \\ A &= -U_0 \quad y \quad B = 0; \\ w &= 100\pi; \\ w_1 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned}$$

Quedando la expresión analítica de la TTR de la siguiente manera:

$$u_{TTR}(t) = U_0 \cos wt - U_0 \cos w_1 t$$

En la siguiente figura podemos observar la representación gráfica de esta expresión.

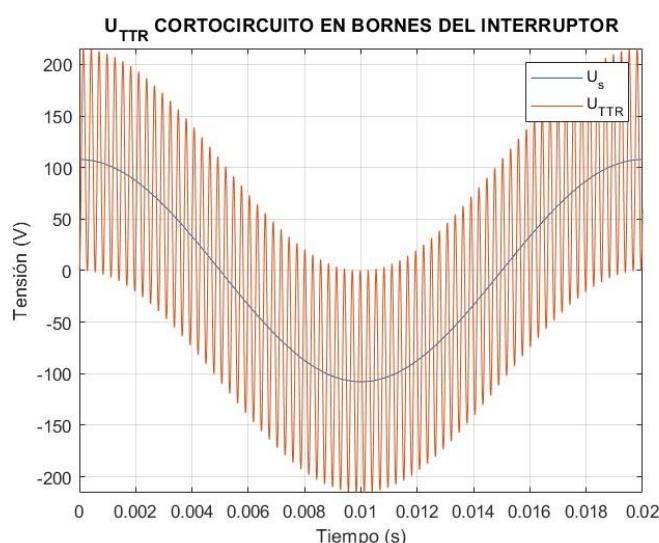


Figura 1. Uttr Cortocircuito en bornes del interruptor

- b) Determinar el valor,  $R_c$ , de la resistencia de preinserción (en paralelo con los contactos del interruptor) que elimina las oscilaciones de la TTR. Obtener la forma analítica y la representación gráfica de la TTR para esa resistencia  $R_c$ .

En primer lugar, para determinar el valor de  $R_c$ , se sigue la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{20 \times 10^{-3}}{0,1 \times 10^{-6}}} = 223,606 \Omega$$

Seguidamente, para la representación gráfica de la TTR se ha seguido el desarrollo mostrado en el *Problema 8* de la colección de problemas, cuyos pasos se indican a continuación.

La expresión general es la siguiente:

$$u_{TTR}(t) = u_\infty(t) + (A + Bt)e^{rt}$$

siendo,

$$\begin{aligned} \underline{U}_\infty &= -j \frac{U_0}{wL} \times \underline{Z}_{eq} \\ \underline{Z}_{eq} &= \frac{1}{Y_{eq}}; Y_{eq} = jwC - \frac{j}{wL} + \frac{1}{R_c} \end{aligned}$$

$$u_\infty(t) = |\underline{U}_\infty| \cos(\omega t - \angle \underline{U}_\infty)$$

Para obtener los coeficientes A y B resolvemos el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} u(0^+) &= 0 \rightarrow A \\ \frac{du}{dt}(t = 0^+) &= 0 \rightarrow B \\ r &= -\frac{1}{2R_c C} \\ A &= -|\underline{U}_\infty| \\ B &= -A \cdot r + |\underline{U}_\infty| \cdot \omega \cdot \sin(\angle \underline{U}_\infty) \end{aligned}$$

Obteniéndose en la siguiente figura la evolución de  $u_s = U_0 \cos \omega t$  frente a  $u_{TTR}$ .

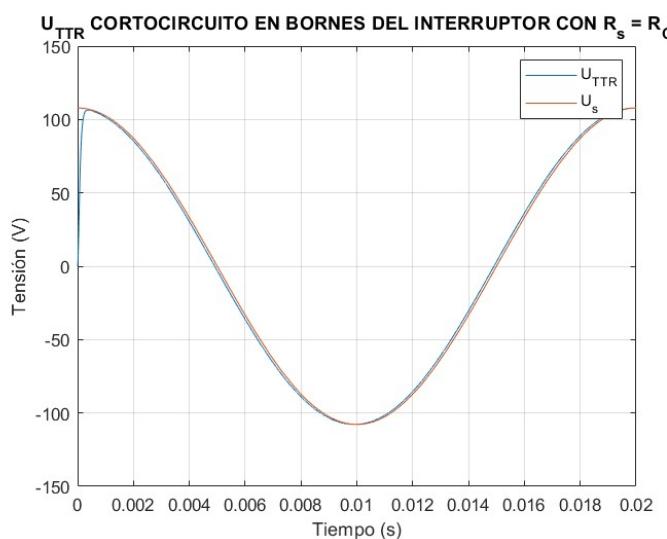


Figura 2. Evolución de  $U_s$  frente a  $U_{TTR}$  con  $R_s=R_c$

- c) Repetir el apartado b) colocando una resistencia de preinserción  $R_s$  de valores  $2R_c$ ,  $4R_c$  y  $10R_c$ .

La principal diferencia que presenta este apartado respecto del anterior es que al modificar el valor de  $R_s$  a un valor superior a  $R_c$ , el sistema pasa de estar críticamente amortiguado a subamortiguado. Por lo que habrá que resolver de nuevo la ecuación diferencial para el caso subamortiguado.

$$(D^2 + \frac{1}{R_s C} D + \frac{1}{LC})u = \frac{1}{C} Di_{cc}$$

en la que la solución general sigue la siguiente forma:

$$u(t) = u_h(t) + u_p(t)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} u_p(t) &= u_\infty(t) = |\underline{U}_\infty| \cos(wt - \angle \underline{U}_\infty) \\ u_h(t) &= e^{\alpha t} (A \cos(\beta t) + B \sin(\beta t)) \end{aligned}$$

con,

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{1}{2R_s C} \\ \beta &= \sqrt{\frac{4}{LC} - \left(\frac{1}{R_s C}\right)^2} \end{aligned}$$

Resolviendo el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} u(0^+) &= 0 \quad (1) \\ \frac{du}{dt}(t = 0^+) &= 0 \quad (2) \end{aligned}$$

De (1) obtenemos:  $A = -|\underline{U}_\infty| \cos(\angle \underline{U}_\infty)$

De (2) obtenemos:  $B = -\frac{w|\underline{U}_\infty| \sin(\angle \underline{U}_\infty) + \alpha A}{\beta}$

Una vez resuelta la ecuación diferencial, pasamos a la representación gráfica de la TTR para cada uno de los valores de  $R_s$  propuestos. Como en el caso anterior se representa frente a la evolución de  $u_s = U_0 \cos wt$ .

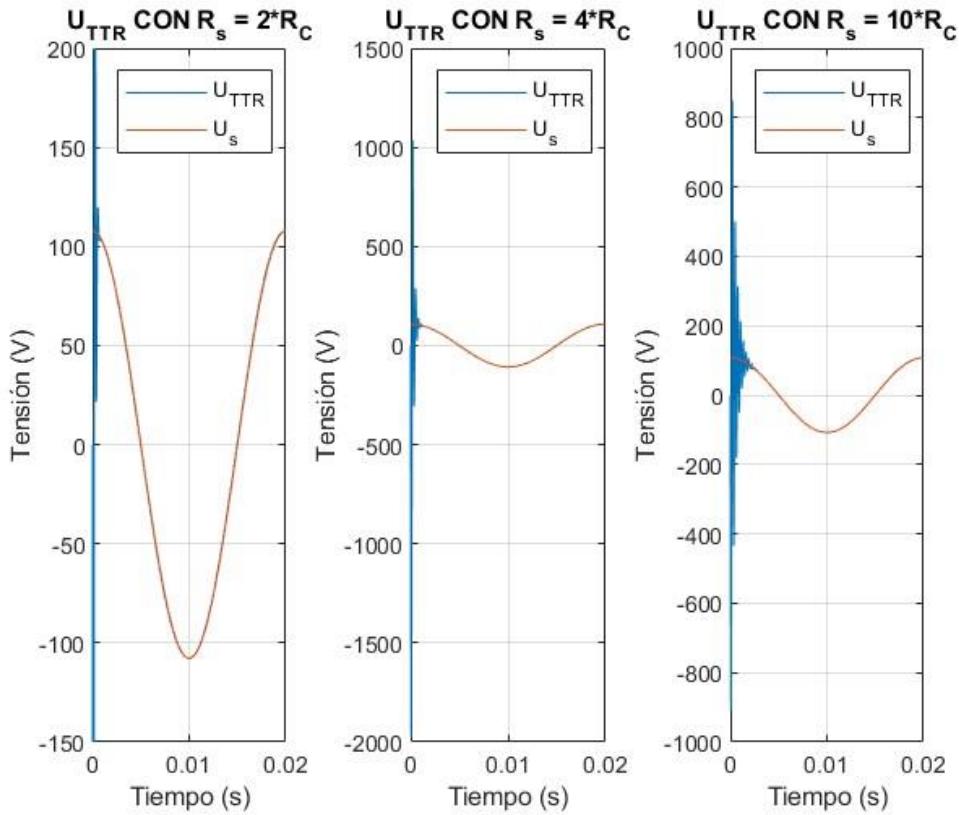


Figura 3. Evolución de  $U_s$  frente a  $U_{TTR}$  en función del valor de  $R_s$

Como podemos observar en las gráficas, a medida que aumentamos el valor de  $R_s$ , alejándolos del valor de  $R_c$ , las oscilaciones de la  $U_{TTR}$  aumentan, como así lo hace su periodo de estabilización hasta  $U_s$ .

- d) Estudiar la TTR, de forma analítica y gráfica, sin añadir la resistencia de preinserción pero considerando una bobina real con un valor de resistencia de  $1\Omega$ . Determinar el factor de amplitud en estas circunstancias.

Dado que ahora no tenemos una resistencia de preinserción, debemos rehacer los cálculos a la hora de calcular la  $U_{TTR}$ . Comenzaremos calculando la nueva  $U_\infty$ , para ello debemos tener en cuenta el valor de la resistencia que se nos indica en el enunciado.

$$U_\infty = I_{cc} \times Z_{eq}$$

Siendo,

$$\begin{aligned} I_{cc} &= \frac{U_0}{R_L + wL} \times (\cos(-\varphi) + j \sin(-\varphi)) \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{wL}{R_L} \\ Z_{eq} &= \frac{(R + jwL) \times -j \frac{1}{wC}}{R + jwL - j \frac{1}{wC}} \end{aligned}$$

$$u_p(t) = u_\infty(t) = |\underline{U}_\infty| \cos(wt - \angle \underline{U}_\infty)$$

Una vez definida la solución particular, pasamos a resolver la ecuación diferencial de este nuevo sistema, para así obtener la expresión final de Uttr. La ecuación diferencial del nuevo sistema es la siguiente.

$$(D^2 + \frac{R_L}{L}D + \frac{1}{LC})u = \frac{R_L + LD}{LC}i_{cc}$$

Resolviéndolo:

$$r = -\frac{R_L}{2L} \pm \sqrt{\frac{(\frac{R_L}{L})^2 - \frac{4}{LC}}{2}}$$

Sustituyendo los valores obtenemos que la raíz es negativa, por lo que estamos ante un sistema subamortiguado. Cuya expresión es la siguiente:

$$u(t) = |\underline{U}_\infty| \cos(wt - \angle \underline{U}_\infty) + u_h(t)$$

$$u_h(t) = e^{\alpha t} (A \cos(\beta t) + B \sin(\beta t))$$

$$\begin{aligned}\alpha &= -\frac{R_L}{2L} \\ \beta &= \sqrt{\frac{4}{LC} - \left(\frac{R_L}{L}\right)^2}\end{aligned}$$

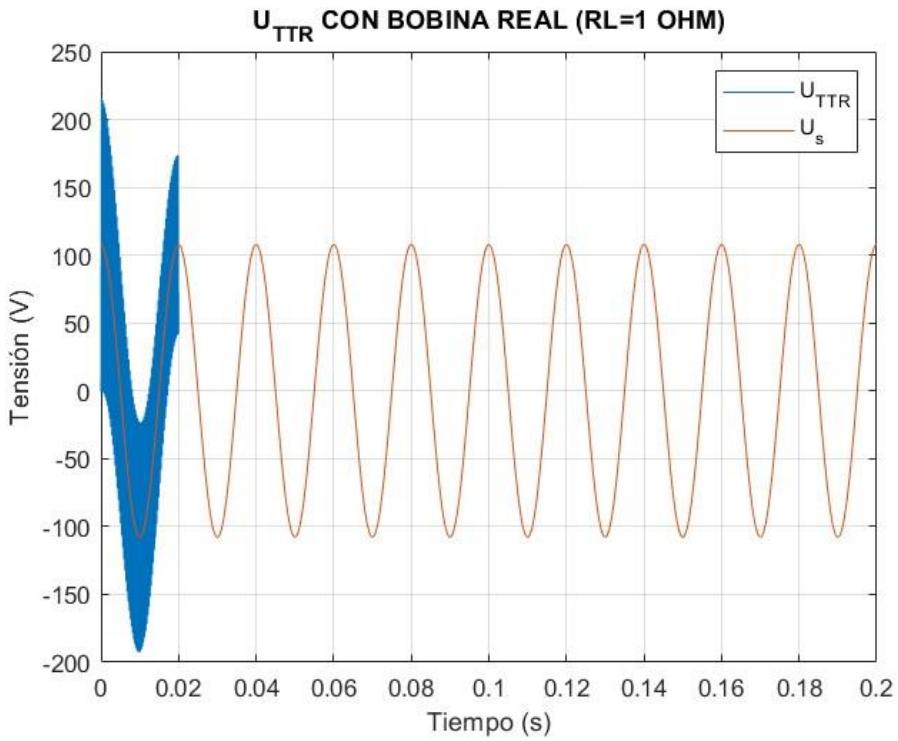
Resolviendo el siguiente sistema:

$$\begin{aligned}u(0^+) &= 0 \quad (1) \\ \frac{du}{dt}(t = 0^+) &= 0 \quad (2)\end{aligned}$$

De (1) obtenemos:  $A = -|\underline{U}_\infty| \cos(\angle \underline{U}_\infty)$

De (2) obtenemos:  $B = -\frac{w|\underline{U}_\infty| \sin(\angle \underline{U}_\infty) + \alpha A}{\beta}$

Una vez resuelta la ecuación diferencial, pasamos a la representación gráfica de la TTR frente a la evolución de  $u_s = U_0 \cos wt$ .



*Figura 4. Evolución de  $U_s$  frente a  $U_{TTR}$  sin resistencia de preinserción y con bobina real*

Por último, vamos a calcular el factor de amplitud, que como hemos visto en la teoría sigue la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de amplitud} = \frac{\text{Valor máximo de la TTR}}{\text{Valor amplitud de la tensión (a 50 hz)}} = \frac{215}{107,8} \approx 2$$

## APARTADO 2

**Hallar las TTR, de forma analítica y gráfica, en el sistema de la Figura 1 si la falta trifásica se produce en la línea a unas distancias del interruptor de 2 km, 10 km, 20 km y 90 km.**

Para realizar el siguiente apartado, empezaremos realizando de forma analítica el cálculo de las tensiones que componen la Uttr, para posteriormente representarlo de forma analítica a partir de los datos proporcionados en el enunciado.

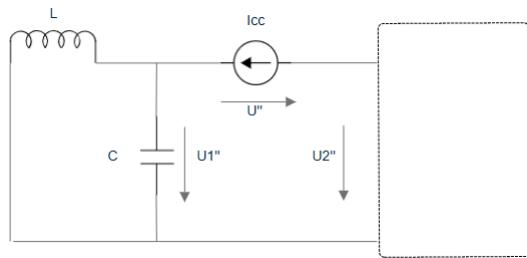


Figura 5. Circuito equivalente Falta Kilométrica

Para el realizarlo de forma analítica partimos del siguiente circuito, siendo nuestro objetivo el cálculo de  $U_1''$  y  $U_2''$ , ya que  $U''$  es la Uttr que buscamos.

Comenzamos determinando  $U_1''$ . Cuyo desarrollo se ha visto en clase y al que no se entrará en detalle, llegando a la siguiente ecuación:

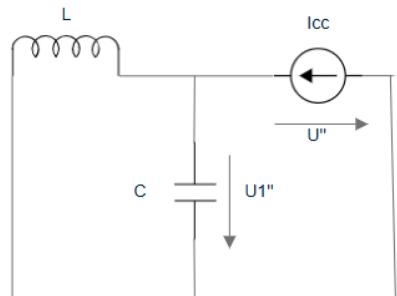


Figura 6. Circuito análisis  $U_1''$

$$U_1'' = [U_0 - U_{10}](\cos \omega t - \cos \omega_1 t)$$

donde,

$$U_{10} = U_0 \frac{L' \cdot l}{L + L' \cdot l};$$

siendo  $L'$  la inductancia de la línea y  $l$  la longitud de la línea

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \omega = 100\pi$$

Una vez analizado  $U_1''$ , procedemos al análisis de  $U_2''$ , para ello analizaremos el siguiente circuito y posteriormente mostraremos la representación de este a partir de la red de reflexiones de Bewley.

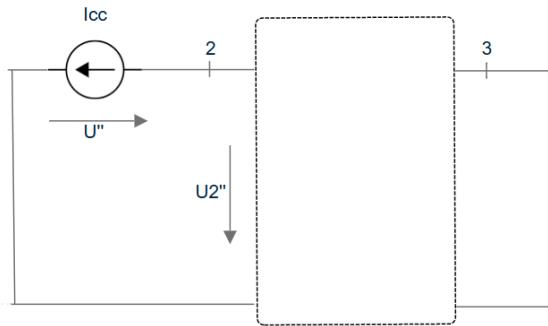


Figura 7. Circuito análisis  $U2''$

Partiendo de la ecuación:  $U_2'' = -Z_0 \cdot i_{cc}$

siendo,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$i_{cc} = I_0 \cdot wt = \frac{U_0}{w(L + L' \cdot l)} \cdot w \cdot t$$

$$\tau = \frac{l}{v}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{L' C'}}$$

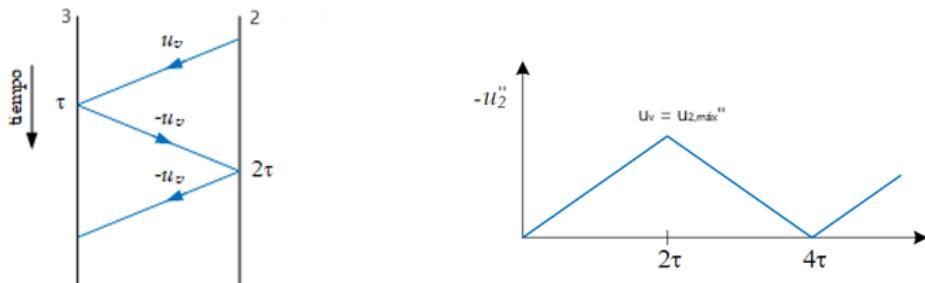


Figura 8. Evolución de la onda tensión asociada a la corriente de cortocircuito a lo largo de la línea

Como se puede observar en la Figura 8, la forma que presenta  $U_2''$  representa una onda triangular cuyo máximo coincide con  $2\tau$ , por lo que, sustituyendo para este valor en  $t$ , y desarrollando la expresión llegamos a la expresión final de  $U_2''$ .

$$U_2'' = -2U_0 \frac{L' \cdot l}{L + L' \cdot l} = -2U_{10}$$

Quedando finalmente la expresión de Uttr;

$$U'' = U''_1 - U''_2 = [U_0 - U_{10}](\cos \omega t - \cos \omega_1 t) + 2U_{10}$$

A continuación, se mostrarán la gráfica de la evolución de Uttr para cada una de la distancias del interruptor propuestas.

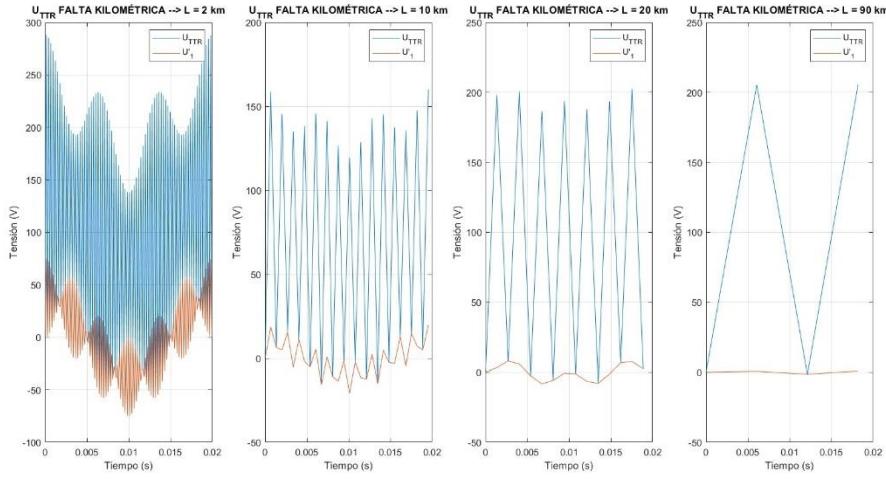


Figura 9. Evolución de Uttr en función de la distancias al interruptor

Podemos observar como a medida que aumenta la distancia de la falta el valor de  $U''_1$  va disminuyendo hasta hacerse nulo (ya que  $U_{10}$  cada vez se aproxima a  $U_0$ ), una vez alcanzado una distancia considerable, mientras que  $U''_2$  a medida que aumenta la longitud de la línea se aproxima a un valor pico de  $-2U_{10} \approx -2U_0$ .

En la siguiente figura se muestra en detalle, para el caso de la falta a una distancia de 2 km, la forma de  $U''_1$  y  $U''_2$ .

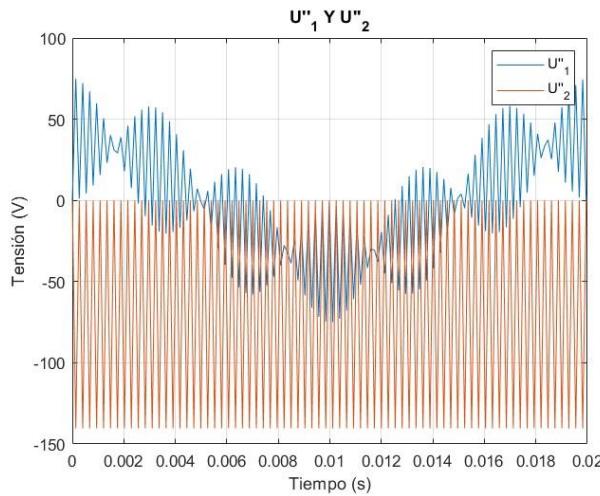


Figura 10. Evolución de  $U''_1$  y  $U''_2$  para una falta a  $l = 2$  km

Para el cálculo de Uttr se aplicaría la expresión detallada anteriormente ( $U'' = U''_1 - U''_2$ ). Dando como resultado la primera gráfica de la Figura 9.

## APARTADO 3

### Con una falta trifásica en bornes del interruptor, punto LX

- a) Estudiar el efecto que produce en la TTR la presencia de una segunda línea, de los mismos parámetros que la existente, conectada a barras y con una longitud de 90 km, que está a circuito abierto (Figura 2a).

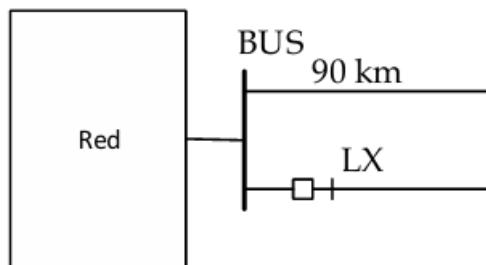


Figura 2<sup>a</sup>

Este apartado se resuelve de manera similar al **apartado 1.c**, ya que al estar la línea de 90 km en paralelo con la línea del interruptor actúa como una especie de resistencia de preinserción, teniendo en este caso el valor de la impedancia característica de la línea.

Se aplica el mismo desarrollo, ya que el valor de la impedancia característica es superior a  $R_c$  ( $2.47 \cdot R_c$ ), estaríamos ante un sistema subamortiguado, por lo que el método de resolución es el mismo, pero en este caso  $R_s = Z_{\text{línea}}$ , dando lugar a la siguiente gráfica.

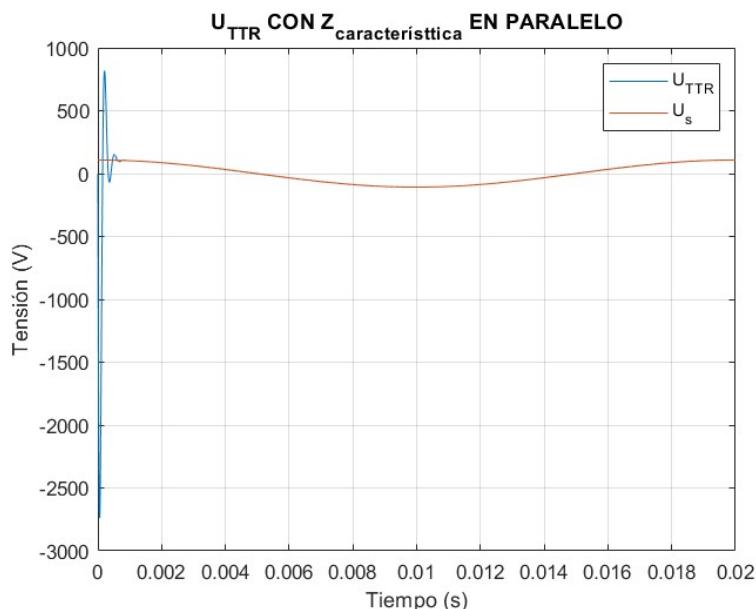


Figura 11. Evolución de  $U_s$  frente a  $U_{TTR}$  con  $Z_{\text{característica}}$  en paralelo

- b) Estudiar el efecto que produce en la TTR un tramo de línea de 120 m de longitud de los mismos parámetros que la existente, conectada en serie entre las barras y el interruptor S (Figura 2b).

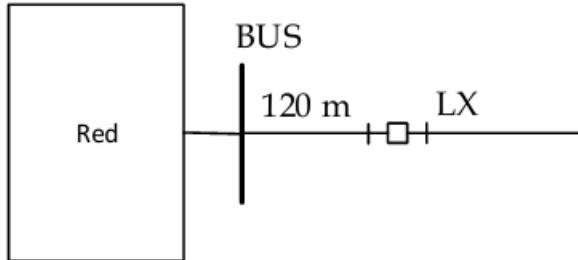


Figura 2b

Para este apartado se aplicará el desarrollo realizado en el **apartado 2**, tratándolo como una falta kilométrica la cual sucede a una longitud de 120 metros del interruptor, por lo que el desarrollo será el mismo que el realizado en el apartado 2, pero para la longitud mencionada. Quedando la siguiente gráfica.

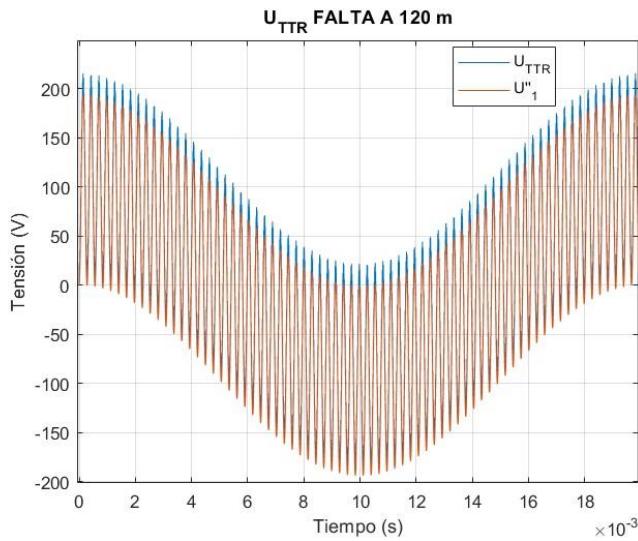


Figura 12. Evolución de Uttr para una falta a una distancia de 120 m del interruptor

Como podemos observar las gráficas prácticamente coinciden debido a que la falta ocurre muy próxima, por lo que la caída de tensión en la línea todavía es muy pequeña, sobre todo si lo comparamos con los casos estudiados en el apartado 2. Ya que a esa distancia el efecto de  $U_{10}$  es bajo debido a la escasa distancia, lo cual afecta tanto a  $U''_1$  como a  $U''_2$ .

# Anexos Código Matlab

## Ejercicio 1

```
% Datos del circuito:  
U0 = 107.8; % kV (valor inicial de la tensión)  
L = 20e-3; % Inductancia en henrios  
C = 0.1e-6; % Capacitancia en faradios  
w = 100*pi; % rad/s  
  
% Frecuencia natural del sistema  
w1 = 1 / sqrt(L * C); % rad/s  
  
% APARTADO A. TENSIÓN U_TTR CORTOCIRCUITO 3F EN BORNES DEL INTERRUPTOR:  
  
fplot(@(x) U0*cos(w*x))  
hold on  
fplot(@(x) U0*cos(w*x)-U0*cos(w1*x))  
xlim([0 0.02])  
legend('U_s','U_T_T_R')  
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Tensión (V)')  
title('U_T_T_R CORTOCIRCUITO EN BORNES DEL INTERRUPTOR')  
grid on;  
%-----  
  
% APARTADO B. TENSIÓN U_TTR CON RESISTENCIA CRÍTICA DE PREINSERCIÓN:  
  
Rc = 1/2*sqrt(L/C); % Resistencia de preinserción crítica  
r = -1/(2*Rc*C);  
  
Y_eq = w*C*i -i/(w*L)+1/(Rc);  
Z_eq = 1/Y_eq; % Impedancia equivalente del circuito formado por la bobina,  
% condensador y resistencia  
mod_Zeq = abs(Z_eq);  
ang_Zeq = angle(Z_eq);  
U_inf = -(U0)/(w*L)*i*Z_eq;  
mod_U_inf = abs(U_inf);  
ang_U_inf = angle(U_inf);  
  
A = -mod_U_inf;  
B = -(r*(A))+mod_U_inf*100*pi*sin(ang_U_inf);  
  
figure  
t = (0:0.000001:0.02);  
f = mod_U_inf*cos(w.*t-ang_U_inf)+A*exp(r.*t)+B*t.*exp(r.*t);  
plot(t,f)  
hold on  
fplot(@(x) U0*cos(w*x))  
xlim([0 0.02])  
legend('U_T_T_R','U_s')  
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Tensión (V)')  
title('U_T_T_R CORTOCIRCUITO EN BORNES DEL INTERRUPTOR CON R_s = R_C')
```

```

grid on;
%-----

% APARTADO C. CON RESISTENCIA DE PREINSERCIÓN:

figure
subplot(1,3,3)
Rs = 10*Rc;

Y_eq = w*C*i -i/(w*L)+1/(Rs);
Z_eq = 1/Y_eq;
mod_Zeq = abs(Z_eq);
ang_Zeq = angle(Z_eq);
U_inf = -(U0)/(w*L)*i*Z_eq;
mod_U_inf = abs(U_inf);
ang_U_inf = angle(U_inf);

a = -1/(2*Rs*C);
b = sqrt(4/(L*C)-1/(Rs^2*C^2))/2;
A=-mod_U_inf*(cos(ang_U_inf));
B=-((mod_U_inf*(sin(ang_U_inf)+a*A))/b);
t = (0:0.000001:0.02);
f = mod_U_inf*cos(w.*t-
ang_U_inf)+exp(a.*t).*A.*cos(b.*t)+exp(a.*t).*B.*sin(b.*t);
plot(t,f)
hold on
fplot(@(x) U0*cos(w*x))
xlim([0 0.02])
legend('U_T_T_R', 'U_s')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R CON R_s = 10*R_C')
grid on;

subplot(1,3,2)
Rs = 4*Rc;

Y_eq = w*C*i -i/(w*L)+1/(Rs);
Z_eq = 1/Y_eq;
mod_Zeq = abs(Z_eq);
ang_Zeq = angle(Z_eq);
U_inf = -(U0)/(w*L)*i*Z_eq;
mod_U_inf = abs(U_inf);
ang_U_inf = angle(U_inf);

a = -1/(2*Rs*C);
b = sqrt(4/(L*C)-1/(Rs^2*C^2))/2;
A=-mod_U_inf*(cos(ang_U_inf));
B=-((mod_U_inf*(sin(ang_U_inf)+a*A))/b);
t = (0:0.000001:0.02);
f = mod_U_inf*cos(w.*t-
ang_U_inf)+exp(a.*t).*A.*cos(b.*t)+exp(a.*t).*B.*sin(b.*t);
plot(t,f)
hold on
fplot(@(x) U0*cos(w*x))
xlim([0 0.02])
legend('U_T_T_R', 'U_s')

```

```

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R CON R_s = 4*R_C')
grid on;

subplot(1,3,1)
Rs = 2*Rc;

Y_eq = w*C*i -i/(w*L)+1/(Rs);
Z_eq = 1/Y_eq;
mod_Zeq = abs(Z_eq);
ang_Zeq = angle(Z_eq);
U_inf = -(U0)/(w*L)*i*Z_eq;
mod_U_inf = abs(U_inf);
ang_U_inf = angle(U_inf);

a = -1/(2*Rs*C);
b = sqrt(4/(L*C)-1/(Rs^2*C^2))/2;
A=-mod_U_inf*(cos(ang_U_inf));
B=-((mod_U_inf*(sin(ang_U_inf)+a*A))/b);
t = (0:0.000001:0.02);
f = mod_U_inf*cos(w.*t-
ang_U_inf)+exp(a.*t).*A.*cos(b.*t)+exp(a.*t).*B.*sin(b.*t);
plot(t,f)
hold on
fplot(@(x) U0*cos(w*x))
xlim([0 0.02])
legend('U_T_T_R', 'U_s')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R CON R_s = 2*R_C')
ylim([-150 200]);
grid on;
%-----

```

% APARTADO D. CON BOBINA REAL (RL = 1 OHM)

```

figure
RL = 1;

fi = atan(w*L/RL);
Icc = U0/sqrt((w*L)^2+RL^2)*(cos(-fi)+sin(-fi)*i);
U_inf = ((w*L*i+RL)*(-i/(w*C)))/((w*L*i+RL)-i/(w*C))*Icc;
mod_U_inf = abs(U_inf);
ang_U_inf = angle(U_inf);

a = -RL/(2*L);
b = sqrt(4/(L*C)-(RL^2/L^2))/2;
A=-mod_U_inf*(cos(ang_U_inf));
B=-((mod_U_inf*(sin(ang_U_inf)+a*A))/b);
t = (0:0.000001:0.02);
f = mod_U_inf*cos(w.*t-
ang_U_inf)+exp(a.*t).*A.*cos(b.*t)+exp(a.*t).*B.*sin(b.*t);
plot(t,f)
hold on
fplot(@(x) U0*cos(w*x))
xlim([0 0.2])
legend('U_T_T_R', 'U_s')

```

```

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R CON BOBINA REAL (RL=1 OHM)')
grid on;



## Ejercicio 2


% Datos del circuito:
C = 0.1*10^-6;
L = 20*10^-3;
U0 = 107.8;
w = 100*pi;
L_linea = 5.8572/(w);
C_Linea = 0.19143*10^-4/(w);
Zc = 553.23;
v=1/sqrt(L_linea*C_Linea);

% l = 2 km
% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':
subplot(1,4,1)
long = 2;
tau = long/v; % seg
x = 0:2*tau:0.02;
y = [0 -2*U0];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U0];
    end
    i = i+1;
end

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':
t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

F = f-y;
plot(t,F);
hold on;
plot(t,f);
xlim([0 0.01])
legend('U_T_T_R', 'U''_1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R FALTA KILOMÉTRICA --> L = 10 km')
grid on;

% l = 10 km
% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':
subplot(1,4,2)

```

```

long = 10;
tau = long/v; % seg
x = 0:2*tau:0.02;
y = [0 -2*U10];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U10];
    end
    i = i+1;
end

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':

t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

F = f-y;
plot(t,F);
hold on;
plot(t,f);
xlim([0 0.01])
legend('U_T_T_R','U''_1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R FALTA KILOMÉTRICA --> L = 10 km')
grid on;

% l = 20 km
% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':

subplot(1,4,3)
long = 20;
tau = long/v; % seg
x = 0:2*tau:0.02;
y = [0 -2*U10];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U10];
    end
    i = i+1;
end

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':

t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

F = f-y;
plot(t,F);

```

```

hold on;
plot(t,f);
xlim([0 0.01])
legend('U_T_T_R', 'U''_1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R FALTA KILOMÉTRICA --> L = 20 km')
grid on;

% l = 90 km
% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':

subplot(1,4,4)
long = 90;
tau = long/v; % seg
x = 0:2*tau:0.02;
y = [0 -2*U10];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U10];
    end
    i = i+1;
end

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':

t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

F1 = f-y;
plot(t,F1);
hold on;
plot(t,f);
xlim([0 0.01])
legend('U_T_T_R', 'U''_1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R FALTA KILOMÉTRICA --> L = 90 km')
grid on;

```

PARA OBTENER LA FIGURA 10 SE UTILIZÓ EL SIGUIENTE CÓDIGO

```

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':

t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':
long = 2;
tau = long/v; % seg
x = 0:2*tau:0.02;

```

```

y = [0 -2*U10];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U10];
    end
    i = i+1;
end
%-----

```

```

figure
plot(t,f)
hold on;
plot(x,y)
hold on
xlim([0 0.02])
legend('U_1','U_2')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U1 Y U2')
grid on;
%-----

```

#### % TENSIÓN FINAL

```

figure
F = f-y;
plot(t,F);
hold on;
plot(t,f);
xlim([0 0.02])
legend('U_T_T_R','U''_1')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R FALTA KILOMÉTRICA')
grid on;
%-----

```

## Ejercicio 3

```

%Datos del circuito:
C1 = 0.1*10^-6;
L1 = 20*10^-3;
U0 = 107.8;
w = 100*pi;
L_linea = 5.8572/(w); % H/km
C_Linea = 0.19143*10^-4/(w); % F/km
Zc = 553.23;

```

% APARTADO A: línea paralela en circuito abierto

```

Y_eq = w*C1*i -i/(w*L1)+1/(Zc);

```

```

Z_eq = 1/Y_eq;
mod_Zeq = abs(Z_eq);
ang_Zeq = angle(Z_eq);
U_inf = -(U0)/(w*L1)*i*Z_eq;
mod_U_inf = abs(U_inf);
ang_U_inf = angle(U_inf);

a = -1/(2*Zc*C1);
b = sqrt(4/(L1*C1)-1/(Zc^2*C1^2))/2;
A=-mod_U_inf*(cos(ang_U_inf));
B=-((mod_U_inf*(sin(ang_U_inf)+a*A))/b);
t = (0:0.000001:0.02);
f = mod_U_inf*cos(w.*t-
ang_U_inf)+exp(a.*t).*A.*cos(b.*t)+exp(a.*t).*B.*sin(b.*t);
plot(t,f)
hold on
fplot(@(x) U0*cos(w*x))
xlim([0 0.02])
legend('U_T_T_R', 'U_s')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Tensión (V)')
title('U_T_T_R CON Z_c_a_r_a_c_t_e_r_i_s_t_t_i_c_a EN PARALELO')
grid on;

```

%APARTADO B: Efecto que produce en la TTR un tramo de línea de 120 m

% Datos del circuito:

```

C = 0.1*10^-6;
L = 20*10^-3;
U0 = 107.8;
w = 100*pi;
L_linea = 5.8572/(w);
C_Linea = 0.19143*10^-4/(w);
Zc = 553.23;
v=1/sqrt(L_linea*C_Linea);

```

---

% TENSIÓN EN LA PARTE IZQUIERDA, U1'':

```

long = 0.12;
tau = long/v; % seg
t = (0:2*tau:0.02);
U10 = U0*(L_linea*long)/(L+L_linea*long);
w1 = sqrt(1/(L*C));
f = (U0-U10)*(cos(100*3.14.*t)-cos(w1.*t));

```

% TENSIÓN EN LA PARTE DERECHA, U2'':

```

x = 0:2*tau:0.02;
y = [0 -2*U10];
i = 0;
while length(y)<length(x)
    if rem(i,2)==0
        y = [y 0];
    else
        y = [y -2*U10];
    end
    i = i+1;

```

```
end  
%-----  
  
figure  
plot(t,f)  
hold on;  
plot(x,y)  
hold on  
xlim([0 0.02])  
legend('U_1','U_2')  
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Tensión (V)')  
title('U1 Y U2')  
grid on;  
%-----
```

#### % TENSIÓN FINAL

```
figure  
F = f-y;  
plot(t,F);  
hold on;  
plot(t,f);  
xlim([0 0.02])  
legend('U_T_T_R','U''_1')  
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Tensión (V)')  
title('U_T_T_R FALTA A 120 m')  
grid on;
```

```
%-----
```