

Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia Elétrica

Eng. Carlos Cachay Matos
ccachay@perutech.com.br

Resumo – Este artigo identifica as correntes e tensões transitórias gerados numa linha de transmissão monofásica durante sua energização. Também se explica como alterar estas correntes transitórias com prejuízos para a rede. Os transitórios são obtidos através das simulações da linha de transmissão feita no Programa ATP, ver arquivos: artigo-a.adp, artigo-b.adp, artigo-c.adp, artigo-d.adp, artigo-e.adp, artigo-f.adp e artigo-g.adp.

Outros arquivos se criaram para simular as alterações das correntes transitórias, ver arquivos: artigo-h.adp, artigo-i.adp, artigo-j.adp, e artigo-k.adp

Palavras chaves – Linha de transmissão, transitórios, qualidade de energia.

I. INTRODUÇÃO

A linha de transmissão de 100 km de comprimento é representada por o modelo Π e é energizada com uma fonte de tensão contínua e senoidal instalada no início da linha. Aliás, uma carga resistiva está instalada no fim da linha. Com simulações feita com o Programa ATP, encontraremos a tensão e a corrente transitórias no início e no fim da linha e a carga resistiva que reduz os transitórios no fim da linha, no lado do consumidor.

II. PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A Resistência, Indutância e Capacitância da linha por unidade de comprimento são:

$R = 0.1904$ ohm/km, $L = 1.318$ mH/km e $C = 0.0087638$ μ F/km.

Para uma linha de transmissão de 100 km de comprimento, temos os seguintes parâmetros utilizados no Programa ATP: $R = 19.04$ ohm, $L = 131.8$ mH e $C = 0.87638$ μ F.

O comprimento da onda é definido por:

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \quad (1)$$

Considerando $f=1000$ Hz, temos $\lambda = 294.2361$ km.

Para uma linha de transmissão de $\lambda/2$ de comprimento, temos os seguintes parâmetros utilizados no Programa ATP: $R = 28.011$ ohm, $L = 193.901$ mH e $C = 1.2893$ μ F.

III. ENERGIZAÇÃO COM FONTE DE TENSÃO CONTÍNUA DE 100 KV

Segundo a simulação (arquivo: artigo-a.adp), com uma carga resistiva maior de 300Ω , a tensão no fim da linha se comporta subamortecido, produzindo uma tensão transitória ruim para o consumidor. Com uma carga resistiva menor ou

igual de 300Ω , a tensão no fim da linha se comporta sobre amortecido, como é mostrado na Fig. 1, e graficamente atinge os 100 kV aos 1.5 ms. devido ao desprezo das perdas da linha, também, graficamente estimamos a constante de tempo da tensão e é aproximadamente de 0.75 ms.

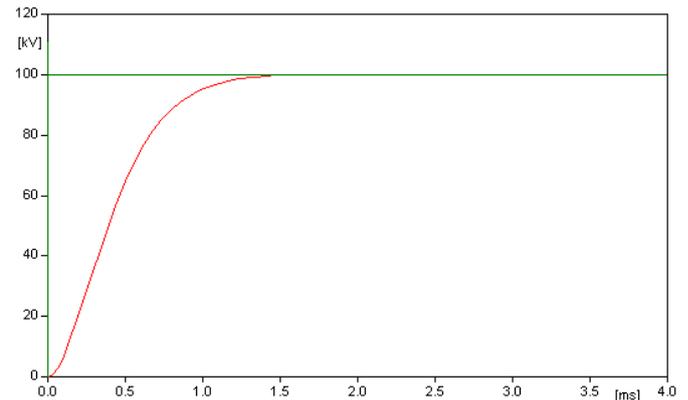


Fig. 1. Tensão no início e no fim da linha. A tensão no fim da linha atinge os 100 kV aos 1.5 ms. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Nesta simulação, a Fig. 2 apresenta a corrente transitória no início da linha que termina cerca de 2 μ seg, um pico de corrente de 745.5 kA é atingido, logo a corrente cai aos 333 Amp. em regime permanente. No fim da linha, a corrente na carga resistiva atinge também os 333 Amp. no regime permanente, e a forma da sinal da corrente é igual da tensão mostrado na Fig. 1.

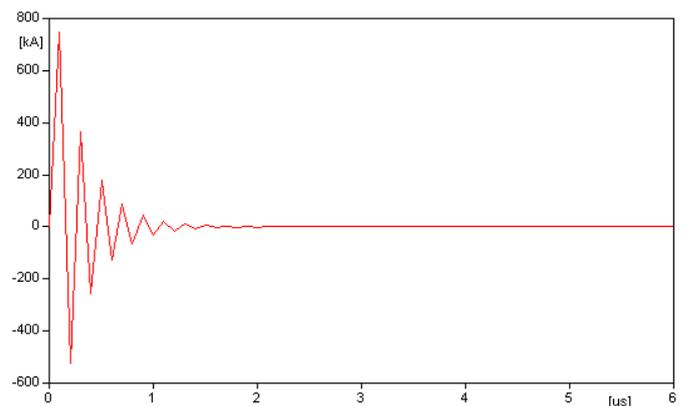


Fig. 2. Corrente transitória no início da linha até os 2 μ s. A corrente atinge os 333 Amp. no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Na Fig. 3. observamos a energização da mesma linha sem perdas durante duas constantes de tempo e logo a desenergização (arquivo: artigo-b.adp). Graficamente encontramos que o tempo da energização (1.5 μ s.) é menor que o tempo de desenergização (aprox. 2.5 μ s.).

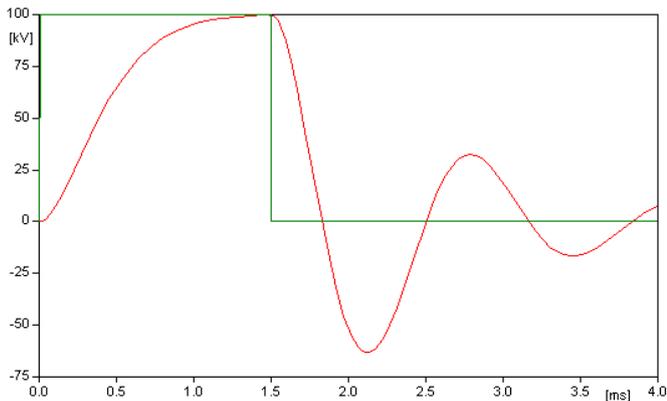


Fig. 3. Tensão no início e no fim da linha. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Nesta simulação, a corrente no fim da linha apresenta a mesma forma da sinal da tensão, atinge os 333 Amp. e logo cai a 0 Amp. Só aparecem picos de corrente no início da linha, veja a Fig. 4.

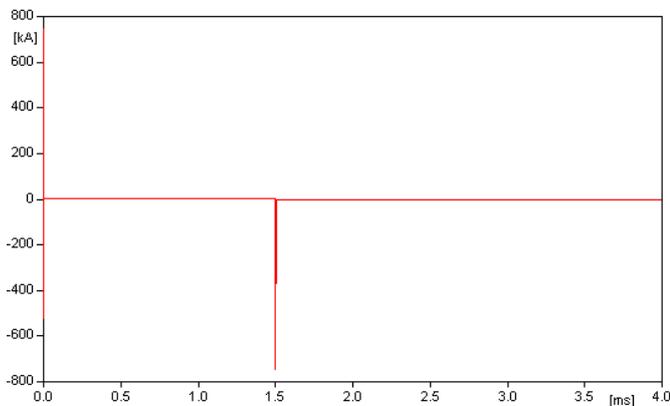


Fig. 4. Picos de corrente no início da linha durante a energização em 0 seg. e a deserenergização em 1.5 mseg. 745kA e -745kA respectivamente.

Nos arquivos: artigo-c.adp e artigo-d.adp se simulam a energização da linha sem desprezar as perdas. A tabla I apresenta um resumo dos resultados em regime permanente.

TABLA I
RESUMO DE RESULTADOS NO INÍCIO E NO FIM DA LINHA EM REGIME PERMANENTE

Valor em DC.	Sem perdas na linha	Com perdas na linha
Fonte de Tensão no início	100 kV	100 kV
Tensão no fim (Carga de 300Ω)	100 kV	94.02 kV
Corrente no início	333 Amp.	313.43 Amp.
Corrente no fim (Carga de 300Ω)	333 Amp.	313.42 Amp.

IV. ENERGIZAÇÃO COM FONTE DE TENSÃO SENOIDAL

Pela alta frequência da tensão do gerador $f = 1000 \text{ Hz}$, existe uma tensão na indutância da linha de transmissão, e a resistência da linha foi considerada, obtendo no final da linha, segundo a simulação (arquivo: artigo-f.adp), uma tensão de 32.6 kV pico a pico em regime permanente, graficamente a tensão transitória dura cerca de 1 ms. e no

começo da energização da linha, atinge os 22.69 kV de amplitude. Veja a Fig. 5.

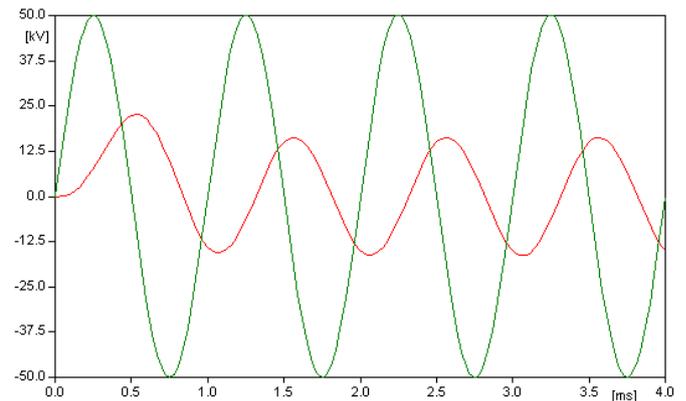


Fig. 5. Tensão senoidal, 1000 Hz, no início e no fim de uma linha de 100 km. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω

Segundo a simulação, se encontra transitórios de corrente no início da linha, esta corrente atinge os 275.26 Amp. de amplitude após da energização da linha, veja a Fig. 6.

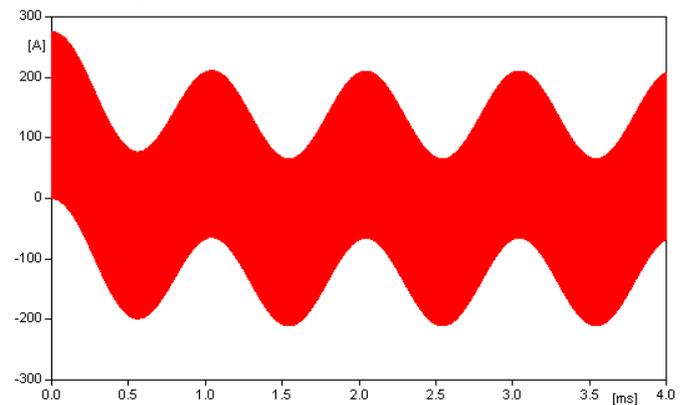


Fig. 6. Corrente transitória de 420 Amp pico a pico no início da linha em regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Graficamente encontramos que a corrente transitória no fim da linha apenas dura cerca de um ciclo (1 ms.), atingindo os 75. Amp. de amplitude após da energização da linha, a forma da sinal da corrente é igual que da tensão no fim da linha, veja a Fig. 7.

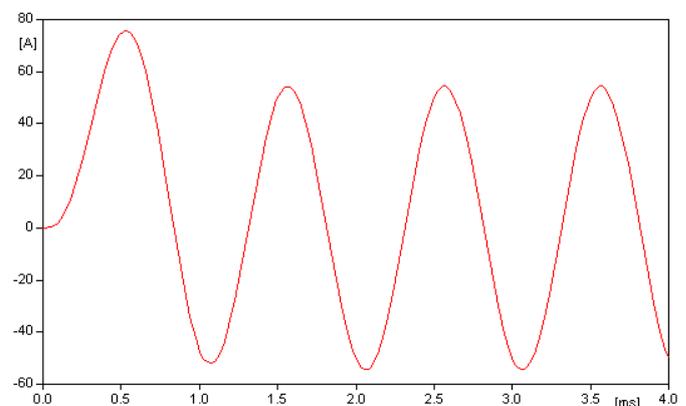


Fig. 7. Corrente de 108.76 Amp pico a pico no fim da linha em regime permanente $f = 1000 \text{ Hz}$. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

No arquivo: artigo-g.adp se simula a energização de uma linha com $1/2$ comprimento de onda, sendo $\lambda/2 = 147.11805 \text{ km}$. A resistência da linha foi considerada.

Segundo a simulação, em regime permanente, a tensão no fim da linha é de 17.62 kV pico a pico. Graficamente a tensão transitória dura cerca de 1 ms. e no começo da energização da linha, atinge os 15.75 kV de amplitude. Veja a Fig. 8.

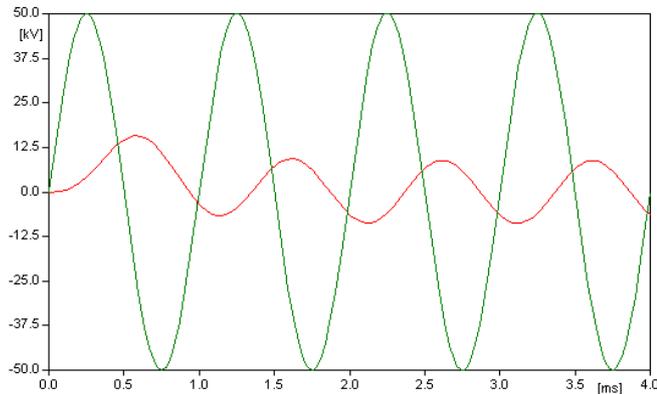


Fig. 8. Tensão senoidal, 1000 Hz, no início e no fim de uma linha de $\lambda/2$ de comprimento em regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300 Ω

Segundo a simulação, se encontra uma corrente transitória de alta frequência no início da linha, esta corrente atinge os 405 Amp. de amplitude após da energização da linha, e no regime permanente atinge os 728.8 Amp. pico a pico, veja a Fig. 9.

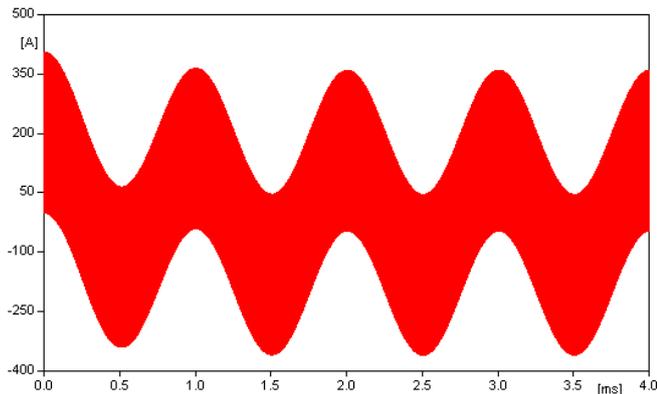


Fig. 9. Corrente transitória de 728.8 Amp pico a pico no início de uma linha de $\lambda/2$ de comprimento em regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300 Ω .

A tabela II apresenta um resumo dos resultados em regime permanente.

TABLE II
RESUMO DE RESULTADOS NO INÍCIO E NO FIM DA LINHA EM REGIME PERMANENTE

Valor pico a pico $f = 1000$ Hz	Linha de 100 km	Linha de $\lambda/2$
Fonte de Tensão no início	100 kV	100 kV
Tensão no fim (Carga de 300 Ω)	32.6 kV	17.62 kV
Corrente no início	420.34 Amp.	728.8 Amp.
Corrente no fim (Carga de 300 Ω)	108.76 Amp.	58.72 Amp.

V. ALTERAÇÕES DAS CORRENTES TRANSITÓRIAS NO INÍCIO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

As formas das sinais da corrente transitória no fim da linha de transmissão são iguais das sinais das tensões mostrado na Fig. 1, Fig. 5, e Fig. 8, respondendo a mesma frequência da tensão da fonte. Mais as formas das sinais da corrente no início da linha apresentam transitórios com elevado pico de corrente (kA.), como é mostrado na Fig. 2, ou com altas frequências diferentes da frequência da fonte, como é mostrado na Fig. 6 e Fig. 9.

Estas correntes transitórias no início da linha podem prejudicar à empresa concessionária. Para evitar estas correntes transitórias, se inseriu uma indutância externa entre a fonte e a linha de transmissão, segundo a simulação no Programa ATP (arquivo: artigo-h.adp), encontramos que para uma indutância Lexterna = 280 mH, as correntes transitórias não atinge as elevadas corrente (kA), e o regime transitório termina cerca de 8 ms. Veja a Fig. 10 e Fig. 11.

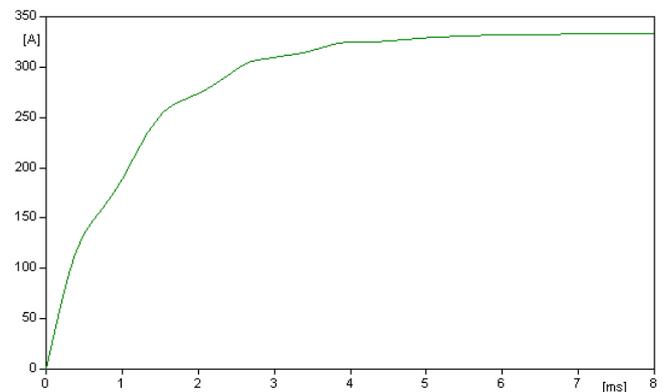


Fig. 10. Corrente transitória no início da linha termina até os 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH. A corrente atinge os 333 Amp. no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300 Ω .

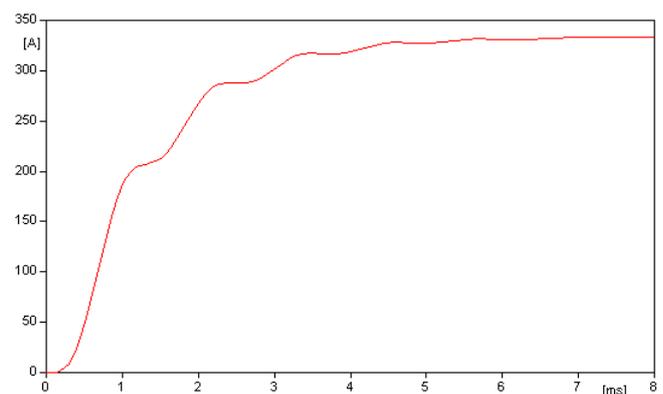


Fig. 11. Corrente transitória no fim da linha termina até os 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH. A corrente atinge os 333 Amp. no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300 Ω .

Com a Lexterna inserida, o tempo de energização da linha acrescentou para os 8 ms. As tensões no início e no fim da linha é mostrado na Fig. 12.

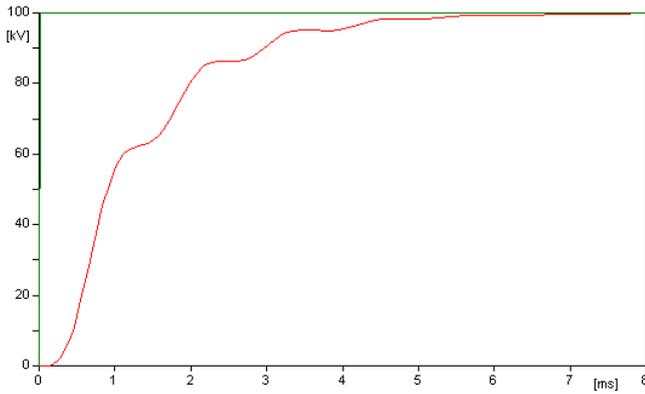


Fig. 12. Tensão no início e no fim da linha . A tensão no fim da linha atinge os 100 kV aos 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

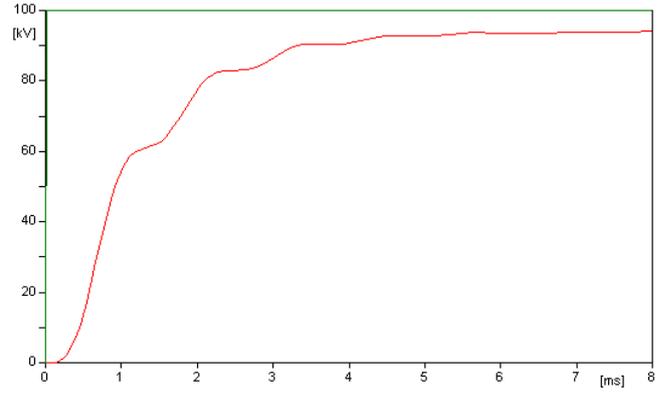


Fig. 15. Tensão no início e no fim de uma linha sem desprezar as perdas. A tensão no fim da linha atinge os 94 kV aos 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

As mesmas formas das sinais de tensão e corrente se arranhou simulando (arquivo: artigo-i.adp) sem desprezar as perdas na linha. Ver Fig. 13, Fig. 14 e Fig. 15.

Agora simulamos a energização de uma linha de transmissão de 100 km de comprimento, sem desprezar as perdas, através de uma fonte senoidal (arquivo: artigo-j.adp) e com a instalação de $L_{ext} = 280$ mH, a corrente transitória no início da linha é mostrado na Fig. 16.

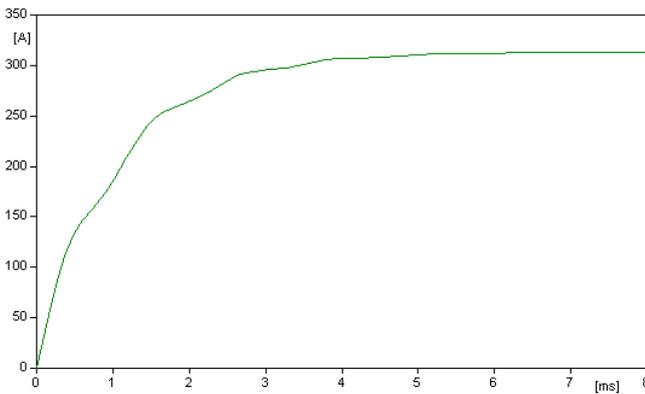


Fig. 13. Corrente transitória no início da linha termina até os 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 313.4 Amp. no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

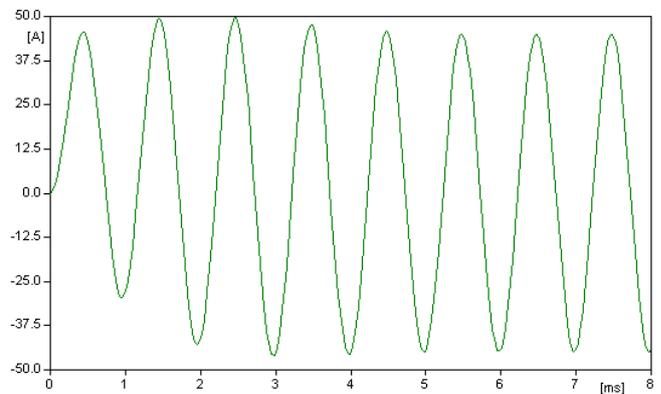


Fig. 16. Corrente senoidal, 1000 Hz, no início da linha. O regime transitório termina cerca dos 4 ms, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 89.6 Amp. pico a pico no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

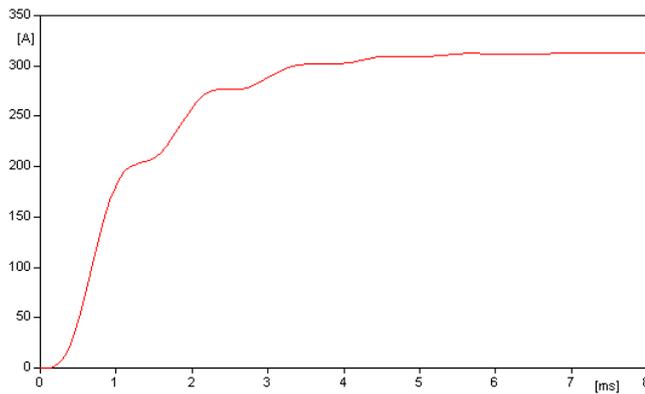


Fig. 14. Corrente transitória no fim da linha termina até os 8 ms, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 313.4 Amp. no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

A corrente transitória no fim da linha é mostrado na Fig. 17.

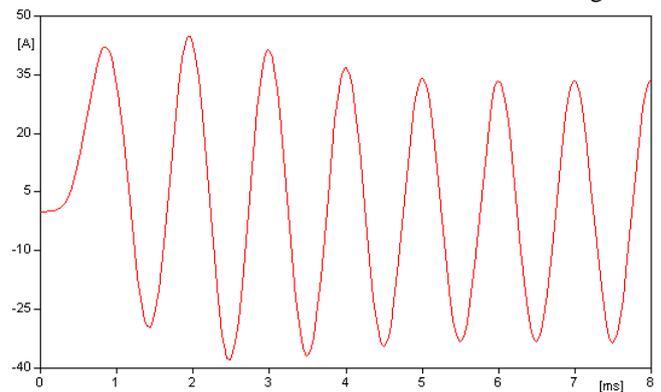


Fig. 17. Corrente senoidal, 1000 Hz, no fim da linha. O regime transitório termina cerca dos 4 ms, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 67 Amp. pico a pico no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Uma fonte de tensão contínua de 100 kV é aplicado no início da linha de transmissão, na Fig. 15. observamos a tensão no início e no fim da linha.

Uma fonte de tensão senoidal 100 kV pico a pico, 1000 Hz, é aplicado no início da linha. Segundo a simulação, em regime permanente, a tensão o fim da linha é de 20 kV pico a pico. Graficamente a tensão transitória dura cerca de 1 ms. Na Fig. 18. observamos a tensão no início e no fim da linha.

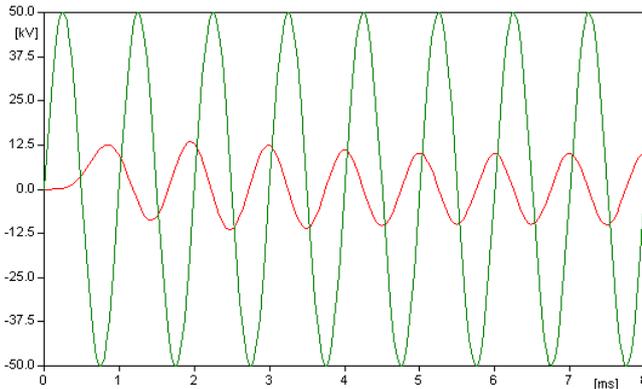


Fig. 18. Tensão senoidal, 1000 Hz, no início e no fim de uma linha de 100 km. com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω

Finalmente, simulamos a energização de uma linha de transmissão de $\lambda/2$ de comprimento, sem desprezar as perdas, através de uma fonte senoidal (arquivo: artigo-k.adp) e com a instalação de $L_{ext} = 280$ mH, a corrente transitória no início da linha é mostrado na Fig. 19. Observamos que o regime transitório termina cerca dos 4 ms,

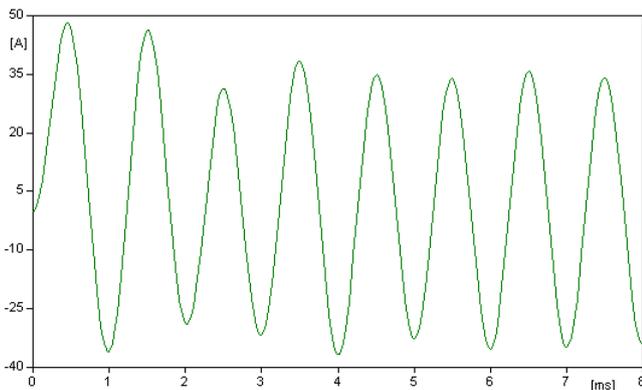


Fig. 19. Corrente senoidal, 1000 Hz, no início da linha de $\lambda/2$ de comprimento, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 68.4 Amp. pico a pico no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

A corrente transitória no fim da linha é mostrado na Fig. 20. O regime transitório termina cerca dos 8 ms e em regime permanente, a corrente no fim da linha é de 13 Amp. pico a pico.

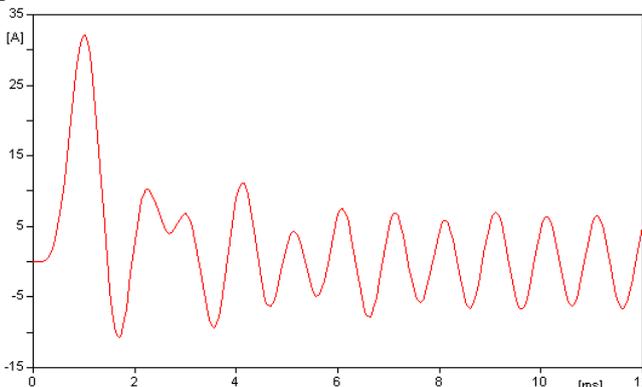


Fig. 20. Corrente senoidal, 1000 Hz, no fim da linha de $\lambda/2$ de comprimento, com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. A corrente atinge os 13 Amp. pico a pico no regime permanente. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω .

Segundo a simulação, com uma linha de $\lambda/2$ de comprimento, a indutância $L_{ext} = 280$ mH prejudicou na corrente transitória no fim da linha, aparecendo um pico de corrente de 32.15 Amp. no regime transitório.

Esta indutância também prejudicou na tensão transitória no fim da linha. Segundo a simulação, em regime permanente, a tensão o fim da linha é de 4 kV pico a pico. Graficamente a tensão transitória dura cerca de 8 ms, aparecendo um pico de tensão 9.64 kV. no regime transitório. Na Fig. 21. observamos a tensão no início e no fim da linha.

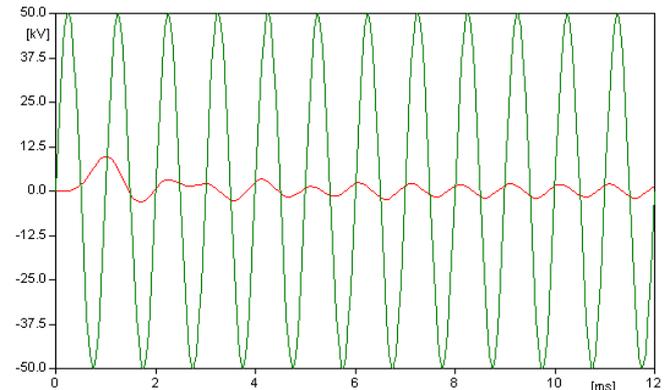


Fig. 21. Tensão senoidal, 1000 Hz, no início e no fim de uma linha de $\lambda/2$ de comprimento. com $L_{ext}=280$ mH e sem desprezar as perdas na linha. No fim da linha está instalada uma carga resistiva de 300Ω

VI. CONCLUSÕES

Segundo as simulações:

- 1.- Cargas menores de 300Ω reduzem os transitórios de tensão e corrente contínua no fim da linha de transmissão, obtendo uma forma de sinal sobre amortecido. Com uma carga resistiva de 300Ω , o regime transitório da tensão termina aos 1.5 ms. e com cargas resistivas menores de 300Ω , o regime transitório da tensão termina após de um tempo maior de 1.5 ms.
- 2.- Com uma carga resistiva de 300Ω instalada no fim da linha, a constante de tempo da tensão contínua no fim da linha é de 0.75 ms e o tempo da energização da linha (1.5 ms) é menor que o tempo de desenergização da linha (aprox. 2.5 ms). Com cargas menores de 300Ω , acrescenta o tempo da energização e a constante de tempo da tensão da linha.
- 3.- Com o acréscimo do comprimento da linha de transmissão, de 100 km para o $\lambda/2$, acrescenta a resistência e a indutância da linha e a tensão e corrente no fim da linha diminui para os 17.62 kV e 58.72 Amp. pico a pico respectivamente. (Ver Tabla II)
- 4.- Com o acréscimo do comprimento da linha de transmissão, de 100 km para o $\lambda/2$, acrescenta a capacitância da linha e a corrente no início da linha acrescenta para os 707.26 Amp. pico a pico. (Ver Tabla II)
- 5.- Os transitórios de corrente no início da linha não se propaga no fim da linha. Para proteger das elevadas correntes transitórias (kA) ou das correntes de alta frequência no início da linha de transmissão de 100 km de comprimento, é necessário instalar uma indutância em série $L = 280$ mH entre a fonte de tensão e a linha de transmissão.

O tempo de energização da tensão contínua no fim da linha aumentou para os 8 ms.

6.- Quando o comprimento da linha aumenta a $\lambda/2 = 147.11$ km, a indutância em série aprimora a corrente transitória no início da linha, mas prejudica a tensão e corrente e tensão transitória no fim da linha, produzindo picos de corrente 32.15 Amp. e de tensão 9.64 kV respectivamente.

VII. REFERENCIAS

Livros:

- [1] Roger C. Dugan / Mark F. McGranaghan / Surya Santoso / H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality. 2da. Edição, p 127.
- [2] William D. Stevenson, Elements of Power System Analysis. 1955, pp. 98-99.