

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL PARA REPRESENTAÇÃO DE ARCOS ELÉTRICOS NO SIMULADOR ATP

L. P. Moura, J. R. Macedo Jr., I. N. Gondim, J. A. F. Barbosa Jr.
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

Resumo – O arco elétrico se manifesta em sistemas elétricos de potência de diversas formas. Estão presentes na abertura de disjuntores, curtos-circuitos e descargas atmosféricas. Os arcos elétricos têm características peculiares devido aos fenômenos físicos e elétricos relacionados e causam efeitos que podem ser identificados quando presentes em um sistema elétrico. A característica dos arcos elétricos que se destaca no contexto da qualidade da energia elétrica é a presença de componentes com frequências harmônicas na corrente. Tal característica foi alvo de vários estudos que abordaram a análise do espectro de frequências da corrente associada ao arco elétrico. Nesse sentido, o presente trabalho considera a implementação de um modelo de arco elétrico no *software* ATP, evidenciando as características do comportamento do mesmo ao ar livre.

Palavras-chave – Arco elétrico, cargas não-lineares, harmônicas, qualidade da energia elétrica, sistemas elétricos de potência.

COMPUTATIONAL IMPLEMENTATION OF MODEL FOR REPRESENTATION OF ELECTRIC ARCS IN SIMULATOR ATP

Abstract – The electric arc manifests in electric power systems in several ways. They are present in the opening of circuit breakers, short circuits and atmospheric discharges. The arcs have peculiar characteristics due to physical and electrical phenomena associated and causes effects that can be identified when present in an electrical system. The characteristic of the electric arcs which stands out in the context of power quality is the presence of harmonic frequencies components in the current. This feature has been the object of several studies that discuss the analysis of the frequency of the current associated with the arc. Accordingly, the present work considers the implementation of a model of electric arc in ATP software, evidencing the characteristics of the behavior of even outdoors.

Index Terms – Electric arc, non-linear loads, harmonics, power quality, electrical power systems.

I. INTRODUÇÃO

O estudo das características dos arcos elétricos é importante para diversas áreas da engenharia elétrica. De fato, vários trabalhos mostram as influências de arcos elétricos nos sistemas elétricos de potência [1]-[3], principalmente nas áreas da qualidade da energia elétrica e da proteção de sistemas elétricos.

No campo da proteção de sistemas elétricos de potência, os arcos elétricos estão presentes na abertura de disjuntores e de outros dispositivos de proteção [4]. Após a abertura dos contatos de um disjuntor, por exemplo, a corrente poderá continuar fluindo por meio de um arco que se forma através do *gap* criado.

Já no contexto da qualidade da energia elétrica, a presença de arcos elétricos no sistema elétrico resulta em distorções harmônicas de corrente e tensão [5]. Nesse contexto, os objetivos do presente trabalho são apresentar os fundamentos físicos e elétricos associados aos arcos elétricos, modelar matematicamente os arcos elétricos a partir de equações existentes na literatura técnica especializada, implementar o modelo no *software* ATP e validar o mesmo a partir da forma de onda de corrente de um arco elétrico ao ar livre obtida em testes de campo.

II. ESTADO DA ARTE

Os arcos elétricos são objetos de estudo desde o início do século XX. O primeiro trabalho relevante a respeito de arcos elétricos foi publicado por H. Ayrton [6]. O trabalho apresenta o processo de modelagem matemática de um arco elétrico de corrente contínua. A partir dos experimentos realizados pela autora, verificou-se que uma dada corrente pode circular através de um arco elétrico, de um dado comprimento, por diferentes potenciais.

Outros trabalhos tiveram como objetivo representar matematicamente as características da resistência do arco elétrico, fazendo uso de equações diferenciais. Um dos principais modelos que descrevem o comportamento dinâmico de um arco elétrico foi apresentada por A. M. Cassie [7]. Cassie escreveu que um arco elétrico é governado principalmente por perdas de convecção durante o intervalo de tempo no qual a corrente tem amplitude relativamente elevada. Partindo desse pressuposto, uma temperatura mais ou menos constante ao longo do diâmetro do arco é mantida. As variações de corrente causam mudanças na seção transversal, mas não na temperatura no interior da coluna de arco.



O. Mayr, outro autor conhecido por seus trabalhos com arcos elétricos, teve uma abordagem radicalmente diferente da de Cassie, considerando uma coluna de arco elétrico com diâmetro constante e temperatura que varia em função do tempo [8].

Desde a publicação dos trabalhos até agora citados, houve certa proliferação de modelos matemáticos relacionados aos arcos elétricos. Contudo, estes modelos são, em sua grande maioria, a evolução das metodologias na realização de análises numéricas, e ainda fazem uso dos conceitos estabelecidos pelas teorias clássicas que foram descritas.

III. CARACTERÍSTICAS DOS ARCOS ELÉTRICOS

O arco elétrico pode ser definido como uma descarga elétrica que flui entre dois eletrodos através de um gás ou uma mistura de gases. Para uma dada distância entre dois eletrodos e uma pequena diferença de potencial aplicada, o gás se comporta como um bom isolante elétrico e não permite a passagem de cargas elétricas. À medida que a diferença de potencial aumenta, a condutância elétrica do gás cresce significativamente a partir de certo ponto. O rompimento do dielétrico resulta então na passagem de corrente elétrica entre os eletrodos [4].

Em um sistema de tensão alternada senoidal, quando a corrente de um arco elétrico aumenta, sua resistência diminui devido ao aumento de temperatura, uma vez que este aumento de temperatura favorece o processo de ionização do gás. Quando a corrente diminui, o nível de ionização também diminui, o que acarreta no aumento da resistência de arco. Portanto, existe uma anormalidade na resistência do arco ao final de cada meio ciclo da tensão aplicada sobre os eletrodos e, como consequência, uma anormalidade na forma de onda da corrente também é observada [4].

Em função do aumento da resistência do arco elétrico ao final de cada meio ciclo, quando a tensão em seus terminais atinge um determinado valor (relativamente baixo), a corrente não pode ser mantida e, conseqüentemente, o fluxo de cargas elétricas no sentido oposto também não é restabelecido imediatamente. Assim, há um período de tempo finito onde não há qualquer fluxo de corrente. Este período de tempo é geralmente referido como “pausa de corrente” [4].

Em outras palavras, durante o período de pausa de corrente o gás perde sua capacidade de condução. Portanto, o campo elétrico necessário para restabelecer o arco após a inversão do sentido da corrente torna-se maior do que o campo elétrico necessário para manter o arco. Isto significa que a tensão de ignição requerida é maior do que a tensão necessária para sustentar o arco e, portanto, a corrente será mantida em zero até que o nível de tensão de ignição seja atingido. Se o arco é restabelecido no semiciclo seguinte a corrente aumenta e a tensão cai ao valor mínimo, praticamente constante durante a maior parte do meio ciclo.

A seqüência de eventos descrita, mostrada na Fig. 1, repete-se durante cada um dos meios ciclos seguintes.

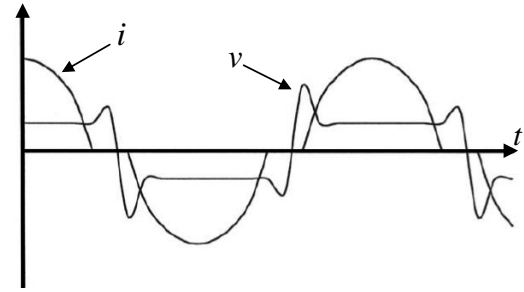


Fig. 1. Típica variação de tensão e corrente de um arco elétrico de corrente alternada.

Com base na Fig. 1, pode-se dizer que a variação da resistência do arco elétrico é um processo dinâmico, com uma relativa redução e subsequente aumento, o que confere ao mesmo uma característica não-linear. Isso ocorre devido às variações das grandezas físicas do arco, as quais sempre buscam uma condição de equilíbrio. Esta condição de equilíbrio é função da inércia de vários dos fenômenos envolvidos no processo.

IV. MODELAGEM DO ARCO ELÉTRICO

Pelas características de formação e manutenção de um arco elétrico apresentadas até o presente momento, fica evidente que a relação entre tensão e corrente do arco se trata de uma relação não-linear. Deste modo, a modelagem do arco elétrico deve levar em consideração estas características.

Alguns estudos mostraram que, para que seja obtida uma resposta mais adequada e representação dinâmica de um arco elétrico, torna-se necessário, num modelo semelhante ao de Mayr, considerar também as suposições de Cassie durante o intervalo de tempo de corrente com maior amplitude. Assim, é possível utilizar um modelo de arco elétrico que seja formulado a partir dos modelos de Cassie e Mayr. Em [9] foi aplicada esta linha de raciocínio, que será de grande utilidade na modelagem realizada no presente trabalho.

As equações propostas por Cassie (1) e Mayr (2) podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{1}{R_C} \frac{dR_C}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{v^2}{E_0^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{R_M} \frac{dR_M}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{vi}{P_0} \right) \quad (2)$$

Onde:

R_C – resistência do arco elétrico pela teoria de Cassie;

R_M – resistência do arco elétrico pela teoria de Mayr;

v – tensão instantânea;

i – corrente instantânea;

E_0 – tensão constante em estado de equilíbrio (corrente elevada);

P_0 – perda constante;

θ – constante de tempo.

As equações podem ser escritas em termos de condutância (sendo C_C a variável utilizada para condutância de Cassie e C_M a variável referente à condutância de Mayr):

$$G_C = \frac{vi}{E_0^2} - \theta \frac{dG_C}{dt} \quad (\text{se } i > I_0) \quad (3)$$

$$G_M = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG_M}{dt} \quad (\text{se } i < I_0) \quad (4)$$

No entanto, isto leva a um ponto de transição de derivadas definidas entre as duas equações, o que pode dar origem a uma série de problemas de convergência em uma simulação. Para permitir uma mudança suave entre as equações, é possível definir um fator de transição:

$$G_{ARC} = [1 - \sigma]G_C + \sigma G_M \quad (5)$$

O fator de transição σ varia entre zero e a unidade, e deve ser uma função decrescente à medida que a corrente diminui. Assim, assume-se que:

$$\sigma = 1 / \exp\left(\frac{i^2}{I_0^2}\right) \quad (6)$$

O ponto de transição (I_0) entre as duas equações é assumido como sendo um instante de apenas alguns microssegundos em torno do ponto onde a corrente atinge amplitude igual a zero. Deste modo, quando a corrente do arco é relativamente pequena, o valor de σ é próximo da unidade e G_{ARC} é dominado por G_M . Quando a corrente é relativamente grande, σ é desprezível, e assim G_{ARC} é dominado por G_C .

Assume-se que o valor da constante de tempo θ é comum em ambas as equações. Em sua forma mais geral, θ também deve ser escrito em função da corrente do arco. Isto se deve ao fato de que θ deve ser maior quando o arco está próximo de sua extinção do que quando o arco se estabiliza. Portanto, a função de amortecimento do arco é assumida da seguinte forma:

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 \exp(-\alpha |i|) \quad (7)$$

Onde θ_0 , θ_1 e α são constantes. Assume-se que $\alpha > 0$ e $\theta_1 \gg \theta_0$. Quando o arco está em ignição ou extinção, i é pequeno e $\theta \approx \theta_1$. Quando i é grande, $\theta \approx \theta_0$.

V. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O *software* ATP é o ambiente computacional escolhido para a implementação do modelo de arco elétrico. Esse *software* é reconhecido devido à sua grande flexibilidade e importância na realização de estudos em sistemas elétricos de potência, permitindo a representação de cargas não-lineares, o que é essencial para o presente trabalho.

Há a possibilidade, em ambiente ATP, de realizar a implementação do modelo do arco elétrico de dois modos distintos. O primeiro é por meio da rotina TACS e, de forma alternativa, por meio da rotina MODELS. O termo “rotina” é

utilizado pois os dois métodos são uma extensão ou parte de um arquivo de dados do ATP. No presente trabalho, optou-se pelo uso da MODELS devido à facilidade de modelagem por meio de linhas de código.

Como o programa ATP não permite obter uma solução contínua no tempo, mas sim em intervalos de tempo discretos, é definido para simulação o chamado passo de integração. As equações (8) e (9) representam as formas discretas das equações (3) e (4), respectivamente.

$$G_{C(n+1)} = \frac{\Delta t}{\theta} \frac{v_{(n)} i_{(n)}}{E_0^2} + G_{C(n)} \left(1 - \frac{\Delta t}{\theta}\right) \quad (8)$$

$$G_{M(n+1)} = \frac{\Delta t}{\theta} \frac{i_{(n)}^2}{P_0} + G_{M(n)} \left(1 - \frac{\Delta t}{\theta}\right) \quad (9)$$

Onde Δt é o passo de integração e n indica as condutâncias G_C e G_M calculadas no n -ésimo passo de integração considerado.

A resistência calculada a partir das equações (ver apêndice) é enviada à resistência controlada TYPE 91 disponível no ATPDraw:

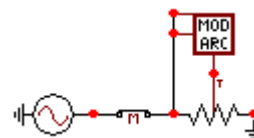


Figura 2. Circuito utilizado na simulação do modelo de arco elétrico.

VI. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A validação do modelo de arco elétrico é feita a partir de uma medição (realizada em trabalhos anteriores) de corrente de um arco elétrico puro realizada em uma rede de distribuição de 13,8 kV. A forma de onda da corrente obtida na medição é mostrada na Fig. 3.

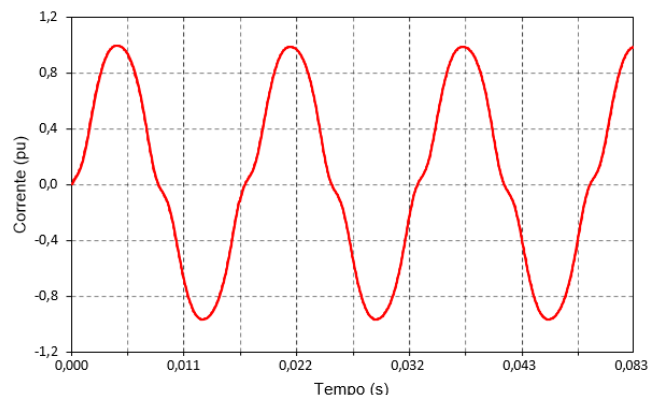


Fig. 3. Forma de onda medida da corrente do arco elétrico puro.

O espectro de frequências da forma de onda da corrente obtida em campo é mostrado na Fig. 4.

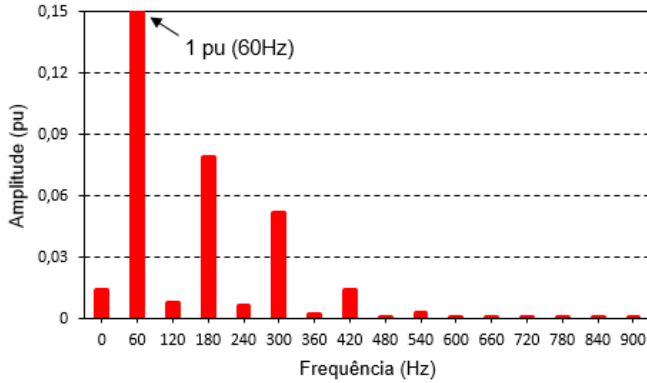


Fig. 4. Espectro de frequências da corrente do arco elétrico ao ar livre com comprimento constante.

O circuito utilizado na validação do modelo leva em conta o nível de curto-circuito do ponto da rede de distribuição onde foram realizadas as medições (Fig. 5). A interface do modelo de arco elétrico proposto encontra-se na Fig. 6.

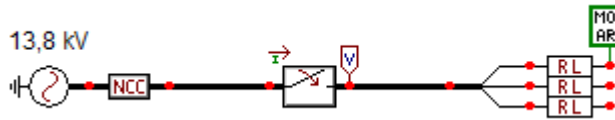


Fig. 5. Circuito utilizado para validação do modelo.

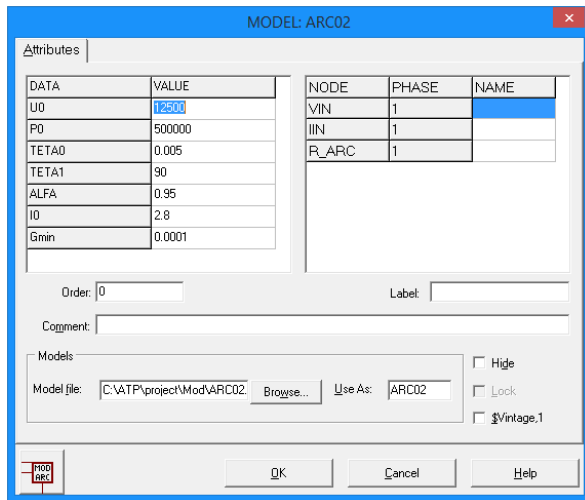


Fig. 6. Interface do modelo de arco elétrico no ATPDraw.

O primeiro passo da validação do modelo é a determinação dos valores mais adequados das constantes do modelo. A grande maioria dos modelos de arcos elétricos presentes na literatura fazem uso de diversos experimentos realizados em laboratório, nos quais é possível variar fatores que influenciam na dinâmica do arco elétrico. As medições de tensão e corrente obtidas a partir destes experimentos são utilizadas para determinar ou estimar as constantes matemáticas empregadas nos modelos e, desta forma, ajustar seus resultados.

No entanto, para o presente trabalho, a única grandeza disponível é a forma de onda da corrente de um arco elétrico. Assim, as constantes do modelo foram escolhidas de maneira

com que a forma de onda de corrente do modelo pudesse representar a forma de onda obtida nos testes de campo.

A forma de onda da corrente resultante do modelo de arco elétrico é apresentada na Fig. 7.

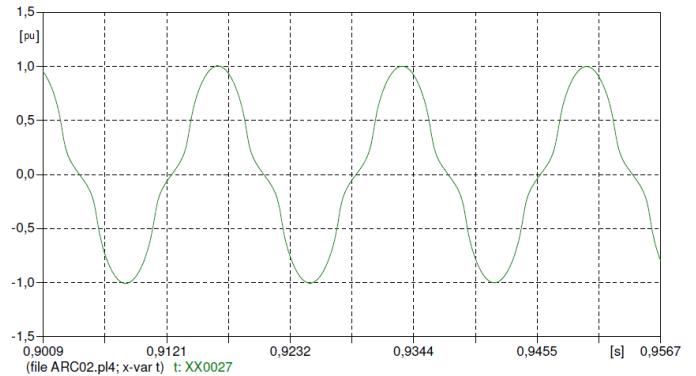


Fig. 7. Forma de onda da corrente obtida a partir do modelo.

Os espectros de frequências das formas de onda da corrente da medição (Fig. 3) e da simulação (Fig. 7) são mostrados na Fig. 8.

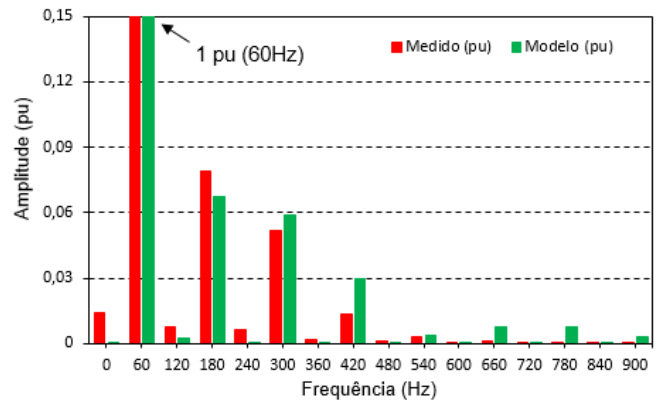


Fig. 8. Validação do modelo de arco elétrico.

Pelo espectro de frequências obtido através do modelo criado, percebe-se que as componentes harmônicas são próximas às da medição de corrente de arco elétrico realizada em campo. Mesmo que não haja medições suficientes para o ajuste das constantes do modelo, é possível obter uma boa aproximação entre as formas de onda.

VII. CONCLUSÕES

Após a realização dos estudos acerca das características dos arcos elétricos e implementação computacional do modelo, pode-se ressaltar as questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho.

Em relação ao *software* ATP, sua utilização para simulação e implementação computacional do modelo de arcos elétricos mostrou-se muito eficiente e satisfatório. De fato, o *software* é conhecido e muito utilizado na análise de circuitos elétricos de potência em regime transitório e permanente.

Apesar da complexidade da dinâmica dos arcos elétricos em sistemas elétricos de potência e também a impossibilidade de

reproduzir tais circunstâncias em laboratório, foi possível validar o modelo ajustando os valores das constantes, o que exigiu o entendimento dos fatores que influenciam na dinâmica de formação do arco elétrico. De forma alternativa, pode-se utilizar valores de constantes encontrados na literatura, para realizar estudos em sistemas onde arcos elétricos se fazem presentes. Sugere-se que, em trabalhos futuros, ensaios sejam realizados em laboratório com o objetivo de determinar as constantes utilizados no modelo.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] A. E. Emanuel, D. Cyganski, J. A. Orr, E. M. Gulachenski, "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, no. 2, pp. 676-686, April 1990.
- [2] N. Elkalashy, *Modeling and detection of high impedance arcing fault in medium voltage networks*, Doctor dissertation, Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering, Helsinki University of Technology, November, 2007.
- [3] Alessandra Sá, *Modelagem de arco elétrico no ar: Aplicações em sistemas de potência*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Novembro, 2010.
- [4] R. Garzon, *High voltage circuit breakers – Design and applications*, Marcel Dekker INC, New York, 1997.
- [5] A. E. Emanuel, J. A. ORR, "An improved method of simulation of the arc voltage-current characteristic," *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 3, pp. 148-154, 2000.
- [6] H. M. Ayrton, *The electric arc*, Printing and Publishing Company, London, 1902.
- [7] A. M. Cassie, "Arc rupture and circuit severity: A new theory," *International Conference on Large Electric High Tension Systems*, pp. 1-14, 1939.
- [8] O. Mayr, "Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens," *Electrical Engineering (Archiv fur Electmtechnik)*, vol. 37, no. 12, pp. 588-608, 1943.
- [9] K. Tseng, Y. Wang, D. M. Vilathgamuwa, "An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 429-436, May 1997.

APÊNDICE

```

MODEL ARC02
INPUT
  VIN      -- tensão de entrada;
  IIN      -- corrente de entrada;

DATA
  U0 {df1t: 28}      -- tensão constante do arco (pelo modelo de Cassie);
  P0 {df1t: 30}      -- perdas constantes no arco (pelo modelo de Mayr);
  TETA0 {df1t: 1E-4} -- constante da função de transição;
  TETA1 {df1t: 100}  -- constante da função de transição;
  ALFA {df1t: 4.8}   -- constante da função de transição;
  I0 {df1t: 4.8}     -- corrente de transição;
  Gmin {df1t: 1E-8}  -- condutância mínima do arco;

VAR
  Gm      -- condutância calculada pelo modelo de Mayr;
  Gc      -- condutância calculada pelo modelo de Cassie;
  Rm      -- resistência calculada pelo modelo de Mayr;
  Rc      -- resistência calculada pelo modelo de Cassie;
  G_ARC   -- condutância do arco elétrico;
  R_ARC   -- resistência do arco elétrico;
  TETA    -- constante de tempo;
  SIGMA   -- fator de transição;

OUTPUT
  R_ARC

INIT
  histdef(Gm):= 0.1
  histdef(Gc):= 0.1

ENDINIT
EXEC
-----
TETA:= TETA0 + (TETA1 / exp(ALFA*abs(IIN)))
SIGMA:= 1 / exp(IIN**2 / I0**2)

Gm:= (timestep/TETA)*(IIN**2)/P0 + prevval(Gm)*(1 - timestep/TETA)
Rm:= 1 / Gm
Gc:= (timestep/TETA)*(VIN*IIN)/(U0**2) + prevval(Gc)*(1 - timestep/TETA)
Rc:= 1 / Gc

G_ARC:= (1 - SIGMA)*Gc + SIGMA*Gm + Gmin
R_ARC:= 1 / G_ARC
-----
ENDEXEC
ENDMODEL

```