

O ALTERNATIVĂ FUZZY PENTRU SISTEME DE PROTECȚIE DE DISTANȚĂ A LINIILOR ELECTRICE

ing. Pierre Rădulescu-Banu
ing. Bogdan Enciu

Institutul de Cercetări în Informatică

Rezumat: Având în vedere faptul că, deși rețelele electrice au evoluat în permanență, impunând condiții noi și instalațiilor de securitate, protecția de bază a liniilor electrice continuă totuși să rămână cea de distanță, care implică sisteme de control computerizate, dintre care unele cu algoritmi greoi, am încercat să găsim o alternativă mai "simplă" și care ar putea oferi un timp de răspuns mai bun.

Articolul schițează ideea realizării unui sistem bazat pe logica fuzzy pentru detectarea defectelor și luarea deciziei în ceea ce privește declanșarea protecțiilor pentru liniile electrice. Testarea și evaluarea performanțelor sistemului se vor face prin comparare cu rezultatele unui program ce are la bază un alt principiu de detectare a defectelor și anume, prin calculul impedanțelor [1].

Cuvinte cheie: protecție de distanță, logica fuzzy, metode numerice.

1. Introducere

Pentru o mai ușoară înțelegere, se consideră utilă prezentarea succintă a principiului protecției de distanță. Protecția de distanță comandă declanșarea la defect (surcircuit cu sau fără punere la pământ) a întrerupătorului liniei protejate cu o temporizare, care depinde de distanța până la locul defectului, după o caracteristică timp-impedanță în trepte (figura 1).

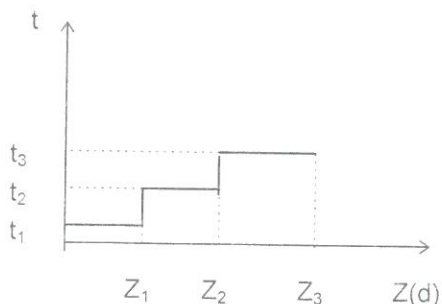


Figura 1. Diagrama de acționare a protecției de distanță

Caracteristica timp-impedanță permite ca protecția de distanță să funcționeze ca protecție de bază pentru linia protejată și ca protecție de rezervă a protecțiilor de distanță ale liniilor situate în aval de linia protejată. Pentru aceasta, impedanțele de prag sunt alese astfel [4]:

- Z_1 acoperă 85% din linia protejată; deci, pentru defecte la o distanță în interiorul celor 85% din linie protecția de distanță va acționa pe treapta I de temporizare (practic instantaneu), iar pentru defecte pe linie în afara celor 85%,

protecția de distanță din stația din aval va acționa pe treapta I;

- Z_2 acoperă 80% din (linia protejată + 85% din linia din aval); deci, pentru defecte pe linia protejată în afara celor 85% sau pe linia din aval în interiorul a 85% (plus corecția de 80%) protecția de distanță va acționa pe treapta II de temporizare, deci, ca protecție de rezervă;
- Z_3 acoperă 80% din (linia protejată + 80% din (linia din aval + 85% din linia din avalul liniei din aval)); deci, pentru defecte pe linia din aval în afara celor 85% sau pe linia din avalul liniei de aval în interiorul a 85% (cu corecțiile de 80%), protecția de distanță va acționa pe treapta III de temporizare, deci, ca protecție de rezervă.

Principalele avantaje ale protecției de distanță, în raport cu celelalte tipuri de protecție folosite pentru linii, sunt următoarele [2, 3]:

- dependența mai mică a sensibilității față de regimul de funcționare a rețelei;
- deconectarea defectelor cu o temporizare cu atât mai mică, cu cât ele sunt mai apropiate;
- delimitarea cu suficientă precizie a zonei protejate, cel puțin pentru linia proprie;
- lipsa necesității unui cablu pilot între stații (necesar în cazul protecției diferențiale de linie, comparabilă ca performanțe de sensibilitate și selectivitate).

2. Abordarea fuzzy

În cadrul sistemului propus, detectarea defectelor se face prin compararea valorilor curenților (de fază și homopolar) cu anumite valori de prag.

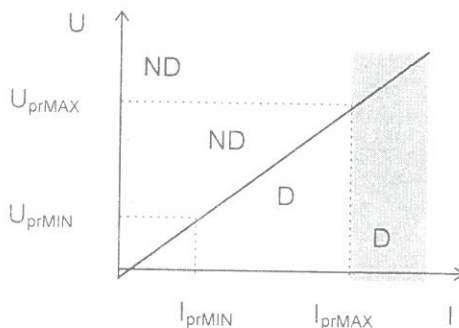


Figura 2. Caracteristica de defect (D - zona de defect, ND - zona de non-defect)

În funcție de caracteristica de defect (figura 2) se fac următoarele considerații:

- pentru valori de curent mai mici decât I_{prMIN} (valoare de prag corespunzătoare scurt-circuitelor cu valori mici de curent) se consideră că nu este situație de defect, indiferent de valorile de tensiune;
- pentru valori de curent cuprinse între I_{prMIN} și I_{prMAX} se consideră că este situație de defect dacă una sau mai multe valori de tensiune se află sub valoarea de prag (valorile de prag pentru tensiune sunt cuprinse între U_{prMIN} și U_{prMAX} și depind de valoarea curentului);
- pentru valori de curent mai mari de I_{prMAX} (valoare de prag corespunzătoare scurt-circuitelor cu valori "normale" de curent) se consideră că este situație de defect, indiferent de valorile de tensiune.

Etapele algoritmului fuzzy ce are ca scop determinarea timpilor de declanșare a protecțiilor, funcție de curenți și tensiuni, sunt următoarele:

1. Se măsoară curentul (I_{mas}) și tensiunea (U_{mas}). În funcție de valoarea curentului, se impun următoarele condiții:
 - dacă $I_{mas} \leq I_{MIN}$, atunci $t_d \rightarrow \infty$ (se analizează următoarea valoare de curent măsurată);
 - dacă $I_{mas} \geq I_{MAX}$, atunci $t_d = 0$ (se declanșează imediat protecția);
 - dacă $I_{mas} \in (I_{MIN}, I_{MAX})$, atunci se trece la pasul 2.
2. Se stabilește tensiunea de prag (U_{pr}) corespunzătoare curentului măsurat (I_{mas}) (din caracteristica de defect). $U_{pr}(I_{mas})$ este utilizat ca referință pentru "deviația" U_{mas} ;
3. Se transformă mărimile I_{mas} și U_{mas} în variabile de tip fuzzy (figura 3);

Mulțimile fuzzy au formă de triunghiuri isoscele, ale caror baze se suprapun în proporție de 1/2, ceea ce înseamnă că, pentru fiecare variabilă, vor exista cel mult două mulțimi fuzzy cu funcții de apartenență referitoare la variabila respectivă. Acest fapt determină ca cel mult patru reguli din baza de reguli fuzzy să fie active la un moment dat.

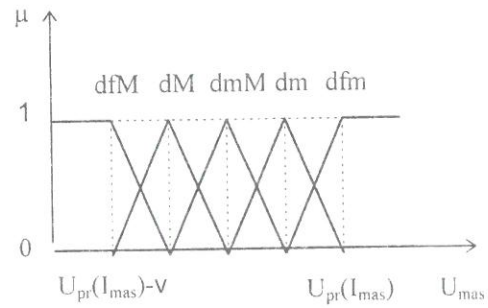
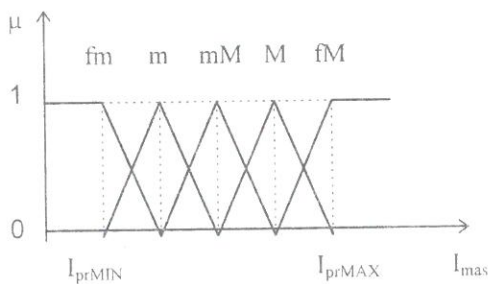


Figura 3. Mulțimile fuzzy și funcțiile de apartenență pentru variabilele I_{mas} și U_{mas} ($v \approx 10\% \cdot U_{nominal}$)

4. Se stabilesc mulțimile fuzzy pentru variabila timp de declanșare t_d (figura 4);

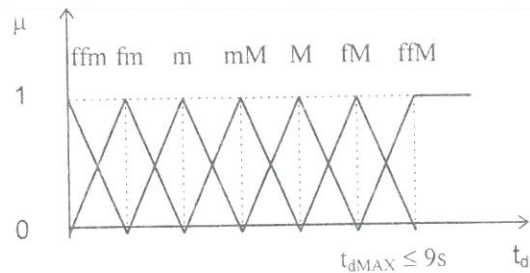


Figura 4. Mulțimile fuzzy și funcția de apartenență pentru variabila t_d

5. Se stabilește baza de reguli fuzzy de tip Mamdani (figura 5);

| I_{mas} | fm | m | mM | M | fM |
|-----------|-----|----|----|----|-----|
| U_{mas} | | | | | |
| dfm | ffM | fM | M | mM | m |
| dm | ffM | fM | M | mM | m |
| dmM | fM | M | mM | m | fm |
| dM | fM | M | mM | m | fm |
| dfM | M | mM | m | fm | ffm |

Figura 5. Baza de reguli fuzzy

6. Se calculează timpul de declanșare prin metoda centrului de greutate:

$$t_d = \frac{\sum_{k=1}^4 \mu_k \cdot i_k}{\sum_{k=1}^4 \mu_k}$$

unde

μ_k este valoarea funcției de apartenență corespunzătoare uneia dintre cele patru reguli active la un moment dat, calculată cu ajutorul operatorului MIN astfel:

$$\mu_k = \text{MIN}(\mu_p(I_{mas}), \mu_q(U_{mas}));$$

unde

- μ_p și μ_q (și complementarele lor $1-\mu_p$ și $1-\mu_q$) rezultă din figura 3;
- $p \in \{fm, m, mM, M, fM\}$;
- $q \in \{dfM, dM, dmM, dm, dfm\}$;

i_k reprezintă mărimea de compensare, corespunzătoare fiecărei reguli fuzzy valide conform figurii 5.

După stabilirea timpului de declanșare, se startează un timer care va marca sfârșitul intervalului de timp după care va avea loc declanșarea protecției. În acest interval, se repetă pașii 1-6 de $[t_d/t_{algoritm}]$ ori. Dacă rezultă o valoare diferită pentru t_d (datorită posibilităților de măsurare a curentului și/sau tensiunii sau a variațiilor acestora datorate defectului) se vor aplica regulile:

- dacă $t_{d\text{ nou}} \geq t_{d\text{ anterior}} + t_t$, atunci se incrementează timer-ul cu diferența $t_{d\text{ nou}} - t_{d\text{ anterior}}$;
- dacă $t_{d\text{ nou}} \leq t_{d\text{ anterior}} - t_t$, atunci nu se modifică setarea timer-ului,

unde

- t_t reprezintă o toleranță de timp de maxim 0,5 s.

Aceste reguli servesc principiului de a nu declanșa în mod pripit o protecție, ci doar atunci când această acțiune este oportună.

3. Algoritmul utilizat pentru testare

Una din tehnicile utilizate frecvent în sesizarea defectelor se bazează pe calculul valorilor de impedanță [3, 4]. Principiul este următorul:

- pentru valori de curent, mai mici decât I_{prMIN} (valoare de prag corespunzătoare scurtcircuitelor cu valori mici de curent), se consideră că nu este situație de defect, indiferent de valorile de impedanță (practic, startarea calculului valorilor de impedanță are loc când se constată depășirea valorii I_{prMIN});
- pentru valori de curent, cuprinse între I_{prMIN} și I_{prMAX} , se consideră că este situație de defect dacă o valoare (sau mai multe) de impedanță devine inferioară valorii de prag corespunzătoare celei mai mari trepte de temporizare;
- pentru valori de curent mai mari decât I_{prMAX} (valoare de prag corespunzătoare scurtcircuitelor cu valori "normale" de curent), se consideră că este situație de defect, indiferent de valorile de impedanță.

Se poate considera că, într-o primă aproximație, între valorile corespunzătoare de impedanță, tensiune și curent există o relație exprimată prin ecuația diferențială [1], [4]:

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) = u(t), \quad (1)$$

unde:

L reprezintă componenta de reactanță a impedanței;

R reprezintă componenta de rezistență a impedanței.

Transformând ecuația diferențială (1) într-o ecuație cu diferențe finite, se obține [1]:

$$u(t) + \varepsilon(t) = a_0 + a_1 \cdot i(t) + a_2 \cdot i(t - \Delta t), \quad (2)$$

unde:

- $\varepsilon(t)$ este dependența de armonicile superioare, zgomot, capacitățile liniei etc;
- a_0 este dependența de componentele continue ale tensiunii și curentului;
- a_1 și a_2 sunt dependente de R și L, conform relațiilor:

$$R = a_1 + a_2; \quad L = a_2 \cdot \Delta t; \quad (3)$$
- Δt reprezintă diferența finită corespunzătoare diferențialei dt.

Dacă se neglijează componenta $\varepsilon(t)$ (ceea ce este corect, ținând seama de filtrarea semnalelor de tensiune și curent, achiziționate din proces), a_1 și a_2 se pot determina prin luarea în considerare a n+1 eșantioane de tensiune și curent, prelevate la n momente de timp succesive (pasul de eșantionare fiind Δt), ceea ce transformă ecuația (2) într-un sistem de n ecuații [1]:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_0 + a_1 \cdot i_1 + a_2 \cdot i_0 \\ u_2 &= a_0 + a_1 \cdot i_2 + a_2 \cdot i_1 \\ u_3 &= a_0 + a_1 \cdot i_3 + a_2 \cdot i_2 \\ &\dots \\ u_n &= a_0 + a_1 \cdot i_n + a_2 \cdot i_{n-1} \end{aligned} \quad (4)$$

ceea ce reprezintă un sistem de ecuații liniare, supradeterminat ale cărui soluții pot fi calculate prin metoda celor mai mici pătrate, obținându-se astfel valorile a_1 și a_2 , din care, aplicând relațiile (3), se determină R și L.

Valorile astfel determinate pentru R și L reprezintă o aproximare a valorilor reale ale rezistenței și reactanței, aproximare cu atât mai bună cu cât pasul de eșantionare este mai mic. Se poate demonstra [1] că, între valorile calculate pentru R și L și valorile reale, există relațiile:

$$R_{\text{calculat}} = R_{\text{real}} - 100 \cdot \Pi \cdot L_{\text{real}} \cdot \text{tg} \left(\frac{100 \cdot \Pi \cdot \Delta t}{2} \right); \quad (5)$$

$$L_{\text{calculat}} = \frac{L_{\text{real}} \cdot 100 \cdot \Pi \cdot \Delta t}{\sin(100 \cdot \Pi \cdot \Delta t)}$$

Determinarea pe această cale a valorilor pentru rezistență și reactanță permite calcularea modulului

impedanței, care urmează a fi comparat cu modulul impedanței de prag.

Rezumând, metoda de calcul a impedanței conține următorii pași:

1. determinarea, prin metoda celor mai mici pătrate, a valorilor a_1 și a_2 , pe baza valorilor de tensiune și curent prelevate în n pași succesivi (pasul de eșantionare: Δt);
2. determinarea valorilor de rezistență și de reactanță, pe baza valorilor a_1 și a_2 ;
3. determinarea valorii modulului impedanței pe baza valorilor de rezistență și de reactanță;
4. compararea valorii modulului impedanței cu valoarea modulului impedanței de prag.

Pentru transpunerea acestei metode de calcul într-un algoritm sunt necesare:

- alegerea valorii pentru pasul de eșantionare (Δt);
- alegerea valorii n pentru numărul de eșantioane u, i .

Cele două valori sunt intercorelate prin dimensiunea ferestrei de observație ($n \cdot \Delta t$). Există o limită maximă pentru dimensiunea ferestrei de observație, datorată necesității ca, pe durata determinării unui set de valori a_1, a_2 (deci în fereastra de observație), R și L (deci a_1 și a_2) să poată fi considerate constante, iar $\varepsilon(t)$ să fie neglijabil. Deoarece însă la apariția unui defect impedanța nu mai este constantă (ceea ce conduce la a_1 și a_2 dependente de timp și $\varepsilon(t)$ neneglijabil), dimensiuni ale ferestrei de observație peste limita maximă ar conduce la inadecvarea ca model matematic al fenomenului sistemului de ecuații (4). Studiile în domeniul protecțiilor moderne de distanță recomandă ca limită maximă a dimensiunii ferestrei de observație valoarea de 15,2 ms (3/4 dintr-o perioadă, pentru frecvența de 50 Hz) [1].

În alegerea valorii pasului de eșantionare trebuie să se țină seama de două cerințe contradictorii:

- valoarea aleasă trebuie să fie cât mai mică, din motive de precizie a determinării valorilor de rezistență și de reactanță (vezi relațiile (5), vezi, de asemenea, intercorelarea între n și Δt);
- cu cât valoarea aleasă este mai mică, cu atât cresc dificultățile datorate restricțiilor de timp real (calculul unui set de valori R, L trebuie să se încheie înaintea achiziției eșantionului de n valori u, i , necesare calculului setului R, L următor).

Cele două cerințe determină o limită inferioară a valorii care poate fi aleasă pentru pasul de eșantionare. Literatura de specialitate consacrată domeniului protecțiilor moderne de distanță recomandă valoarea de 0,8 ms ca limită inferioară în alegerea valorii pasului de eșantionare [1].

Valoarea numărului de eșantionări rezultă din valorile alese pentru dimensiunea ferestrei de observație și a pasului de eșantionare: $n < 20$.

În funcție de valoarea rezultată a impedanței se stabilesc timpurile de declanșare conform figura 1:

$0 < Z < Z_1$, declanșare în intervalul $(0, t_1)$;

$Z_1 < Z < Z_2$, declanșare în intervalul (t_1, t_2) ;

$Z_2 < Z < Z_3$, declanșare în intervalul (t_2, t_3) .

unde

$$t_1 \leq 35 \text{ ms și } t_3 \leq 9 \text{ s [5].}$$

4. Observații

În luarea deciziei de a declanșa o protecție pentru o linie electrică intervin doi factori deopotrivă de importanți:

- precizia cu care se stabilește dacă este stare de defect sau nu pe linia electrică;
- timpul în care se declanșează protecția în caz de defect.

Din punctul de vedere al acestor doi factori trebuie evaluate performanțele algoritmului fuzzy propus. În afara problemelor ridicate de precizia măsurărilor curenților și tensiunilor, performanțele ar putea fi îmbunătățite, eventual, prin alegerea unor alte forme pentru funcțiile de apartenență și/sau a unui alt număr de mulțimi fuzzy corespunzătoare variabilelor. Restricțiile impuse timpului de răspuns în ceea ce privește declanșarea protecțiilor sunt destul de severe. Numărul relativ mic de reguli este favorabil unei bune viteze de răspuns. De asemenea, dacă aprecierea timpilor de declanșare nu este satisfăcătoare, funcție de caracteristicile liniei electrice, se poate reconsidera baza de reguli.

Algoritmul bazat pe metode numerice va fi utilizat pentru o analiză comparată a performanțelor algoritmului fuzzy.

Bibliografie

1. **BORNARD, P.**: Application des techniques numériques a l'étude d'une protection de distance par microordinateur, RGE, Tome 87, Nr. 2/5, Paris, Juillet/Aout 1978, pp. 611-616.
2. **GAL, S.**: Scheme de rele complexe în energetica, Editura Tehnică, București, 1988.
3. **ZANE, R., CHENZBRAUN, I.**: Protecția de distanță a liniilor electrice, Editura Tehnică, București, 1968.
4. *** : Numerical Line Protection Relay, TSA511 v2.2., Siemens AG, 1992.
5. *** : Modernizarea elementelor de comandă, protecție, măsură, semnalizare și automatizare din stațiile de transformare de 110 / MT KV, RENEL, DGTDEE, 1994.