

MODELAREA INTERDEPENDENȚELOR FUNCȚIONALE ÎN CADRUL SISTEMELOR DE PUTERE

dr. ing. Lucia Cristina Dumitriu
dr. ing. Cătălin Dumitriu

Institutul Politehnic București

Rezumat. Obiectivul fundamental al unui sistem de putere este de a satisface în fiecare moment necesarul de putere al consumatorilor, parametrii energiei electrice livrate trebuind să se înscrie într-o bandă de valori admisibile.

În lucrare se definesc factorii care influențează realizarea acestui obiectiv și mărimile, ale căror abateri de la valorile corespunzătoare regimului optim constituie perturbații ale alimentării cu energie electrică.

Elaborarea strategiilor corecte de exploatare a sistemului de putere necesită cunoașterea efectelor pe care aceste perturbații le produc asupra receptoarelor de energie electrică.

Modelarea funcției obiectiv, necesară în procesul de optimizare a strategiei de funcționare a sistemului, necesită parcurgerea unor etape intermediare de elaborare a unor modele cât mai corecte ale diferitelor efecte și interdependențe funcționale.

În lucrare se prezintă câteva din aceste modele: ale caracteristicilor de sarcină, ale pierderilor de putere și energie, ale duratei de viață a unor instalații electrice, precum și modelul general al funcției obiectiv a costurilor suplimentare.

Cuvinte cheie. Consumatori industriali, alimentare cu energie electrică, calitatea energiei electrice, perturbații în alimentare, daune de calitate, optimizarea funcționării sistemelor de putere.

1. Introducere

Caracteristica funcțională de bază a sistemelor electroenergetice constând în simultaneitatea producție-consum de energie electrică, comportă atât un aspect cantitativ, decurgând din necesitatea de a livra în fiecare moment necesarul de putere activă și reactivă al consumatorilor, corespunzător curbelor de sarcină, cât și un aspect calitativ, ca urmare a faptului că parametrii energiei livrate trebuie să se înscrie într-o bandă de valori admisibile.

Factorii care influențează realizarea obiectivului sistemului sub aspect cantitativ sau calitativ sînt:

- structura sistemului de alimentare, care condiționează capacitatea de transport și indicatorii de fiabilitate;
- compoziția și caracteristicile sarcinii, influențînd condițiile de calitate ale energiei electrice.

Funcționarea receptoarelor de energie electrică ale consumatorilor industriali în condiții tehnico-economice optime, necesită asigurarea condițiilor de continuitate în alimentare și de calitate a energiei electrice livrate, stabilite la proiectarea acestor instalații. Mărimile ale căror abateri de la valorile

corespunzătoare regimului optim constituie perturbații ale alimentării cu energie electrică sînt:

- gradul de asigurare cu energie electrică a consumatorilor;
- capacitatea căilor de transmisie a energiei electrice;
- tensiunea rețelei de alimentare;
- frecvența tensiunii de alimentare;
- gradul de deformare a undei de tensiune;
- gradul de nesimetrie a tensiunii.

Datorită interdependenței specifice producție-consum din cadrul sistemului energetic, elaborarea strategiilor corecte de exploatare a sistemului, pentru evitarea efectelor perturbațiilor în alimentarea consumatorilor industriali, necesită cunoașterea cât mai profundă a acestor efecte, precum și a influenței reciproce dintre diferite perturbații.

Elaborarea unui model complex, al funcției obiectiv necesar în procesul de optimizare a strategiei de funcționare a sistemelor de putere, necesită parcurgerea unor etape intermediare de elaborare a unor modele cât mai corecte de reprezentare a acestor efecte asupra diferitelor componente ale sistemului.

În cele ce urmează ne vom opri asupra unora dintre aceste modele.

2. Caracteristicile de sarcină ale receptoarelor electrice.

Sistemul electroenergetic este un sistem cu reacție, în care fiecare din cele două componente de bază producție-consum, răspunde la dinamica funcționării celeilalte. Aceasta face ca sarcina să participe, atât la modificarea regimurilor de funcționare ale sistemului, prin dinamica consumului, cât și la autoreglarea sistemului în ansamblu.

Din punct de vedere al consumatorului de energie electrică, răspunsul de autoreglare este descris de caracteristicile consumatorului reprezentînd dependența mărimilor lui de stare (putere activă, putere reactivă, alunecare, turație etc.) de mărimile electrice de stare (tensiune, frecvență) ale sistemului, la bara de racordare.

După durata regimului analizat, caracteristicile consumatorului sînt statice sau dinamice, dar avînd în vedere atât constantele de inerție mari ale motoarelor, duratele scurte ale perturbațiilor grele, de cădere importantă a tensiunii, cât și variațiile lente ale frecvenței în aceste regimuri, se poate considera că modelarea consumatorilor prin caracteristici statice de putere este suficient de corectă și pentru regimurile dinamice.

Caracteristicile statice de sarcină afectează deci, atât performanțele sarcinii individuale, cât și performanța generală a sistemului de putere funcționînd sub condiții de perturbație. Modelarea sarcinii electrice prin caracteristici statice de putere devine, astfel, necesară

pentru elaborarea strategiilor de funcționare ale sistemului electroenergetic de bază:

- studiilor detaliate de regimuri ale sistemului;
- optimizării programului de deconectare a sarcinii în condiții de perturbare a funcționării sistemului;
- determinării efectelor variațiilor parametrilor de calitate - tensiune și frecvență - ai energiei electrice asupra diferitelor categorii de consumatori;
- calculului exact al pierderilor de putere și energie în regimurile caracterizate de valori ale tensiunii și frecvenței diferite de cele nominale.

Pentru majoritatea sarcinilor electrice, puterile activă și reactivă absorbite sînt funcție de valorile efective ale tensiunii de alimentare și de frecvența acestora (excepție fac sarcinile pur rezistive care nu depind de frecvență):

$$P = P(U, f) \quad (1)$$

$$Q = Q(U, f)$$

La variații relativ mici ale tensiunii și frecvenței, ΔU respectiv Δf , se produc variații corespunzătoare ale puterii active și reactive, ΔP respectiv ΔQ . Presupunînd că P și Q sînt funcții derivabile de U și f și dezvoltînd în serie Taylor cu neglijarea termenilor de ordin superior, se obține modelul general:

$$\Delta P \approx \frac{dP}{dU} \Delta U + \frac{dP}{df} \Delta f \quad (2)$$

$$\Delta Q \approx \frac{dQ}{dU} \Delta U + \frac{dQ}{df} \Delta f$$

Cel mai adesea însă se urmărește determinarea unor parametri caracteristici, definiți cu relațiile:

$$K_p^U = \frac{dP}{P_n} / \frac{dU}{U_n} \quad K_q^U = \frac{dQ}{Q_n} / \frac{dU}{U_n} \quad (3)$$

și

$$K_p^f = \frac{dP}{P_n} / \frac{df}{f_n} \quad K_q^f = \frac{dQ}{Q_n} / \frac{df}{f_n}$$

reprezentînd variațiile procentuale ale puterii active, respectiv reactive, la variația cu un procent a tensiunii, respectiv frecvenței față de valoarea nominală.

În literatura de specialitate, caracteristicile statice ale sarcinii individuale sînt date fie sub formă analitică în funcție de tensiune, fie sub forma unor curbe determinate experimental, fie prin parametri caracteristici.

Avînd în vedere funcționarea sistemului în condiții de variații simultane ale tensiunii și frecvenței, pentru determinarea efectelor acestora asupra unor receptoare, recent s-au elaborat modele analitice complexe ale caracteristicilor statice pentru motoare asincrone și, utilizînd pentru parametrii schemei echivalente valori determinate cu ajutorul metodei elementului finit, s-au obținut [1] caracteristicile complexe $P(U, f)$ și $Q(U, f)$, pentru aceste receptoare de energie electrică.

3. Pierderile de putere și energie în cabluri

Capacitatea căilor de transmisie a energiei electrice este limitată de atingerea temperaturii maxim admisibile de funcționare. Depășirea acestei temperaturi conduce la modificarea ireversibilă a proprietăților fizico-chimice ale dielectricului în cazul cablurilor și al transformatoarelor de putere.

Pierderile care apar în cablurile de putere se datorează acțiunii combinate a curentului și tensiunii asupra elementelor componente ale cablului. Astfel, în conductor și învelișurile metalice apar pierderi prin efect Joule datorită curentului de sarcină, iar în izolație apar pierderi dielectrice datorită tensiunii.

Pentru o sarcină dată, pierderile Joule din conductor se exprimă cu relația:

$$W_J = R(\theta) I^2 \quad (4)$$

în care rezistența conductorului este o funcție de temperatura sa.

Angenta unghiului de pierderi este, de asemenea, o funcție de temperatură, pierderile dielectrice se exprimă cu relația:

$$W_d = CU^2 \omega \operatorname{tg} \delta(\theta) \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

unde $\operatorname{tg} \delta$ poate fi exprimată printr-o relație de forma:

$$\operatorname{tg} \delta(\theta) = A \cdot e^{\frac{C}{\theta+273}} + B \cdot e^{\frac{D}{\theta+273}} \quad (6)$$

A, B, C, D fiind constante caracteristice tipului de izolație a cablului [2].

Exprimînd pierderile Joule din mantaua metalică și armătura în funcție de pierderile Joule din conductor, s-a obținut pentru pierderile totale din cablu următoarea relație:

$$\Delta P = n_c [R(\theta) I^2 (1 + \lambda_1(\theta) + \lambda_2(\theta)) + CU^2 \omega \operatorname{tg} \delta(\theta)] = (7)$$

$$= n_c [I^2 (R(\theta) + K_{\lambda_1} + K_{\lambda_2}) + CU^2 \omega \operatorname{tg} \delta(\theta)]$$

unde $K_{\lambda_1}, K_{\lambda_2}$ sînt două constante corespunzătoare coeficienților λ_1 și λ_2 ai cablului.

Prelucrînd în funcție de temperatură relația (7) se obține forma:

$$\Delta P = K_1 + K_2 \theta_c + K_3 f(\theta_c) \quad (8)$$

unde θ_c este o funcție de timp reprezentînd răspunsul în temperatură al conductorului la o sarcină de tip treaptă, iar $f(\theta_c)$ reprezintă funcția ce exprimă variația tangentei unghiului de pierderi cu temperatura conductorului.

Pierderile de energie se obțin cu relația:

$$\Delta W = K_1 t + K_2 \int_0^t \theta_c(t) dt + K_3 \int_0^t f(\theta_c(t)) dt \quad (9)$$

Relațiile (8) și (9) permit calculul pierderilor de putere, respectiv energia din cablu, luînd în considerare toate componentele pierderilor (în conductor, ecran, armătură, dielectric), precum și variația acestora cu temperatura. Avînd în vedere faptul că rezistența conductorului crește față de valoarea de calcul cu

20-26% în regim nominal ($\theta_{\max} = 65 + 85^{\circ}\text{C}$), mergînd pînă la 34% în regim forțat de funcționare de tipul 100(300) h/an cu $90 + 105^{\circ}\text{C}$, corelația pierderilor în funcție de temperatură apare deosebit de importantă. Determinarea temperaturii conductorului se poate face cu ajutorul uneia din următoarele metode de calcul ale regimului termic [1]:

- metoda modelelor termice echivalente ale cablurilor;
- model de calcul cu ajutorul funcțiilor integral-exponențiale;
- model de calcul pas cu pas al regimului termic tranzitoriu;
- model de calcul cu element finit;

model de calcul al regimului termic folosind o tehnică cu sensibilități.

4. Durata de viață a cablurilor și transformatoarelor

Îmbătrînirea dielectricilor poate fi definită ca o pierdere progresivă a proprietăților fizico-chimice, sub acțiunea prelungită a unor factori ca tensiunea electrică, temperatura, umiditatea, frecvența, tensiunea mecanică etc.

Plecînd de la constatarea deteriorării proprietăților chimice, legea generală a îmbătrînirii dielectricilor sub tensiune constantă a fost dedusă, prin analogie, din teoria generală a vitezei reacțiilor chimice [3]:

$$\frac{E}{E_0} = \left(1 + \frac{t}{T}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (11)$$

Relația (11) arată că, îmbătrînirea dielectricilor este guvernată de trei parametri de material: rigiditatea dielectrică inițială E_0 , viteza de îmbătrînire constantă k și ordinul reacției de îmbătrînire n .

$k = \frac{1}{nC}$, iar $T = \frac{1}{nkE_0^n}$ este constanta de timp a

îmbătrînirii; n , C - parametrii constanți.

Degradarea continuă a izolației cablurilor sub acțiunea temperaturii și a tensiunii aplicate, are ca efect reducerea duratei de viață a acestor echipamente, relația între temperatură și durata de viață fiind:

$$t \cdot e^{-\frac{b}{\theta}} = ct \quad (12)$$

b fiind parametrul corespunzător al distribuției de probabilitate tip Weibull. Ca urmare a degradării izolației are loc o creștere a intensității de defectare a cablului, conducînd la întreruperea căii de alimentare. Pentru frecvențe mari ale întreruperilor datorită străpungerii electrice a cablurilor, se pune problema înlocuirii acestora, dar decizia trebuie luată pe baza unui calcul economic, datorită efortului considerabil antrenat. Pentru aceasta se definește durata de viață economică a unui cablu, ca fiind numărul de ani de la

punerea sa în funcțiune, pînă în momentul în care înlocuirea sa este mai puțin costisitoare decît menținerea sa în serviciu. Rezultă, deci, că durata de viață economică a unui cablu este o funcție de intensitatea de defectare a cablului, de costul reparațiilor, costul înlocuirii și valoarea daunelor prin întreruperea alimentării consumatorului deservit. Minimizînd funcția obiectiv a costurilor totale actualizate se obține durata de viață economică a cablului:

$$N = I \frac{a}{(kC_c)^{(1)}} + \frac{(kC_c)^{(2)}}{(kC_c)^{(1)}} \frac{1+a}{a} \quad (13)$$

unde C_c este costul căderii unui cablu, (1 - cablul vechi, 2 - cablul nou), k - parametru caracterizînd rata căderilor, I - investiția asociată cu înlocuirea cablului. Durata de viață a transformatoarelor funcționînd în condiții de suprasarcină, se poate determina pe baza legii de reacție a lui Arrhenius [4]:

$$\log D = A + \frac{B}{\theta} \quad (14)$$

unde D reprezintă durata de viață a izolației; A , B - constante de material; $\theta = \theta_{\text{pcc}} + 273^{\circ}\text{C}$, unde θ_{pcc} reprezintă temperatura punctului cel mai cald al înfășurării.

Pentru evaluările cantitative se utilizează mărimea numită reducerea procentuală a vieții transformatorului, definită cu relația:

$$D [\%] = \frac{100t_{\text{ss}}}{10 \frac{B_{\text{pcc}}}{\theta + 273} + A} \quad (15)$$

unde t_{ss} reprezintă timpul de funcționare în suprasarcină, în ore.

Temperatura punctului cel mai cald al transformatorului se poate calcula, atît în regim sinusoidal la suprasarcină, cît și în regim armonic, ambele fiind regimuri perturbate [1].

5. Optimizarea strategiei de funcționare a sistemelor de putere

Aspectele prezentate mai sus sînt o parte din efectele tehnice, cuantificate în modele matematice, care se produc în cadrul sistemelor de putere la funcționarea în regimuri perturbate.

Ele se constituie într-o componență a cheltuielilor în cadrul modelului matematic de optimizare a strategiei de funcționare a sistemului. La nivelul consumatorului industrial această optimizare se poate realiza pe baza comparației dintre cheltuielile anuale totale pe care urma să le suporte consumatorul industrial funcționînd în condiții stabilite la proiectare (care rezultă în urma unui studiu de optimizare) și cheltuielile suportate de consumator în condițiile unei alimentări cu energie electrică supuse la diferite perturbații.

Cheltuielile anuale totale pentru energie electrică ale unui consumator industrial au două componente:

$$C = C_{cal} + C_{alim} \quad (16)$$

unde C_{cal} reprezintă cheltuielile datorate abaterii calității alimentării, respectiv energiei electrice. În această categorie intră cheltuielile antrenate de întreruperile în alimentare, cele datorate abaterii tensiunii și/sau frecvenței de la valorile nominale (optime), cheltuielile antrenate de funcționarea instalațiilor în regimuri de suprasarcină, precum și cele ce apar ca urmare a măsurării afectate de erori a energiei electrice;

C_{alim} reprezintă cheltuieli de alimentare cu componente pentru sistemul de generare (C_g), transportul (C_t) și distribuție (C_d).

Deoarece analiza se realizează la nivelul sistemului de distribuție, cheltuielile în sistemul de generare și transport se reprezintă prin costuri marginale (CM) a căror valoare este funcție de energia intrată în rețeaua de distribuție (W_d).

În aceste condiții cheltuielile de alimentare se exprimă cu relația:

$$C_{alim} = C_g + C_t + C_d = W_d CM + C_d \quad (17)$$

cu

$$W_d = W_c + \Delta W \quad (18)$$

unde W_c reprezintă energia primită de consumator, iar ΔW reprezintă pierderile de energie în rețeaua de distribuție.

În cadrul componentei C_{cal} și într-o lungă listă de cheltuieli [1] se regăsesc și cheltuielile antrenate ca urmare a reducerii duratei de viață a instalațiilor electrice (cabluri, transformatoare, motoare electrice) datorită funcționării în condiții de perturbare a alimentării (suprasarcini, regim deformat, tensiuni reduse).

Modelul general de optimizare se bazează pe compararea cheltuielilor din cele două regimuri - real (C_r) și nominal (C_n):

$$\Delta C = C_r - C_n = (C_{cal,r} - C_{cal,n}) + (W_{c,r} - W_{c,n}) + (\Delta W_r - \Delta W_n) CM + (C_{d,r} - C_{d,n}) \quad (19)$$

Diferența dintre cele două costuri, ΔC , se constituie în cheltuieli suplimentare sau daune, suportate de consumatorul industrial și reprezintă efectul economic al abaterii parametrilor funcționali ai sistemului de la valorile nominale.

6. Concluzii

Funcționarea eficientă a sistemelor de putere necesită asigurarea parametrilor de calitate ai energiei electrice livrate consumatorilor industriali.

Datorită interdependențelor funcționale din cadrul acestor sisteme, orice abatere a acestor parametri de la valorile admisibile, antrenează efecte tehnico-economice la nivelul întregului sistem (atît energetice, cît și tehnologice) și care se constituie în costuri de exploatare suplimentare.

Pentru optimizarea strategiei de funcționare a sistemului apare, deci, necesară cunoașterea aprofundată a acestor interdependențe pentru cuantificarea lor într-un model matematic reprezentînd funcția obiectiv.

Modelul matematic propus constituie un instrument util, atît în proiectarea, cît și exploatarea sistemelor de putere, permițînd optimizarea tehnico-economică a regimurilor de funcționare ale sistemului electroenergetic, stabilirea limitelor admisibile de variație ale parametrilor de stare, stabilirea mijloacelor optime de limitare a abaterii lor, oferind și posibilitatea unei suboptimizări a funcționării rețelelor industriale în condiții de calitate a energiei electrice impuse.

Bibliografie

1. LUCIA-CRISTINA, DUMITRIU - *Contribuții la stabilirea daunelor la consumatorii industriali, produse prin perturbarea alimentării cu energie electrică*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic București, 1987.
2. IWATA, Z., ș.a. - *New modified polyethylene paper proposed for UHV cable insulation*. În: IEEE Trans. on PAS, no.5, 1977, pp.1573- 1582.
3. KIERSZTYN, S.E. - *Formal theoretical foundation of electrical aging of dielectrics*. În: IEEE Trans. on PAS, no. 11, 1981, pp. 4333 - 4341.
4. LAHOTI, B.D., FLOWERS, D.E., - *Evaluation of transformer loading above nameplate rating*. În: IEEE Trans. on PAS, no.4, 1981, pp. 1989 - 1998.

sus. Să considerăm mulțimile X, C mulțimea obiectelor și mulțimea conceptelor. Nu presupunem pentru început structuri suplimentare pe X sau C deși cel puțin C are natural structuri "logice" evidente. Pentru a modela "operațional" experimentul fuzzy considerăm ca date:

- pentru fiecare $f \in C$ o relație de pre-ordine pe X ; $xR_f y$
- pentru fiecare $x \in X$ o relație de pre-ordine pe C ; $fR_x g$
- o relație de pre-ordine pe $X \times C$, R astfel încît:
 $xR_f y \Rightarrow (x, f) R (y, f)$, $fR_x g \Rightarrow (x, f) R (x, g)$ (\cdot), x, y, f, g .

Este probabil ca procesul de cunoaștere să creeze structuri de tipul celei de mai sus. Aceste structuri pot fi variabile modificîndu-se cu fiecare experiență pînă la un anumit prag de "stabilitate". Pe o anumită treaptă a acestei evoluții unele relații de pre-ordine pot deveni "cuantificabile" și, deci, evaluabile.

Experimentul fuzzy apare astfel ca o modificare într-o structură pre-ordonată, un pas într-un sistem dinamic cu intrări date empirice și stări mulțimi pre-ordonate. Detalii privind lucrul cu noțiunile de mai sus vor apărea într-o viitoare lucrare. Problema dezbătută pe scurt în

această lucrare a fost concretizarea (precizarea) conjecturii Negoită.

Trebuie remarcat că, alături de structura de ordine, o anumită importanță în modelarea cu mulțimi fuzzy prezintă relațiile de toleranță. Schimbarea, proprie indivizilor empirici, poate fi mai bine înțeleasă cu ajutorul relațiilor de toleranță. Faptul că fibrele unei mulțimi fuzzy sînt clase de echivalență împiedică înțelegerea schimbării "nuanțelor" sau, mai exact, mișcarea indivizilor empirici în interiorul conceptului

BIBLIOGRAFIE

1. **NEGOIȚĂ, C.V.:** *Fuzzy Systems*, Editura Abacus Press, 1981.
2. **TOTH, H.:** *From fuzzy-set theory to fuzzy set-theory: Some critical remarks on existing concepts*. În: *FUZZY Sets and Systems*, nr.23, 1987.
3. **TOTH, H.:** *Categorical properties of f-set theory*. În: *Fuzzy Sets and Systems*, nr.33, 1989.
4. **NIETZSCHEFR, F.:** *Despre adevăr și minciună în înțeles extra-moral*. În *Viața Românească*, vol. LXXXV, nr.1, București 1990.