



(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2015 00839**

(22) Data de depozit: **16/11/2015**

(41) Data publicării cererii:
29/07/2016 BOPI nr. **7/2016**

(71) Solicitant:
• **UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN
TIMIȘOARA, PIAȚA VICTORIEI NR.2,
TIMIȘOARA, TM, RO**

(72) Inventatori:
• **PANĂ ADRIAN, STR. DIVIZIA 9
CAVALERIE NR. 2, SC. A, AP. 4,
TIMIȘOARA, TM, RO**

(74) Mandatar:
**CABINET DE PROPRIETATE
INDUSTRIALĂ TUDOR ICLĂNZAN,
PIAȚA VICTORIEI NR.5, SC.D, AP.2,
TIMIȘOARA**

(54) **METODĂ DE CONTROL PENTRU UN COMPENSATOR
CAPACITIV AUTOMAT DESTINAT ÎMBUNĂTĂȚIRII
FACTORULUI DE PUTERE ȘI ECHILIBRĂRII SĂRCINII ÎN
REȚELE ELECTRICE TRIFAZATE CU PATRU
CONDUCTOARE**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă de control pentru un compensator capacitiv automat, destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, implementată prin intermediul unui program de calculator în sistemul de control al compensatorului. Metoda conform invenției constă în aceea că: definește, ca mărimi de intrare ale procesului de reglaj, valorile efective ale componentelor reale și imaginare ale curenților de secvență ai sarcinii, definește, ca fiind mărimi de control ale procesului de reglaj, nivelurile de compensare a componentelor de secvență pozitivă, negativă și zero ale curenților de sarcină, definește ca fiind mărimi de ieșire ale procesului de reglaj valorile celor șase susceptanțe ale compensatorului, calculate cu relații analitice care stabilesc legătura directă cu mărimile de intrare, utilizează în procesul de reglaj o succesiune de etape de operare, în scopul obținerii unor valori negative sau nule pentru mărimile de ieșire, prin corecția iterativă a mărimilor de control, realizează reglajul susceptanțelor compensatorului astfel încât să se obțină o distribuție optimă a puterii reactive capacitive de compensare între cele două funcții ale compensatorului, cea de îmbunătățire a factorului de putere și, respectiv, cea de echilibrare, și realizează distribuția optimă a puterii reactive capacitive de compensare pe secvența pozitivă între cele două circuite trifazate ale compensatorului, din condiția

minimizării numărului și valorii susceptanțelor care trebuie anulate ca urmare a faptului că nu pot fi aduse în domeniul capacitiv.

Revendicări: 1
Figuri: 2

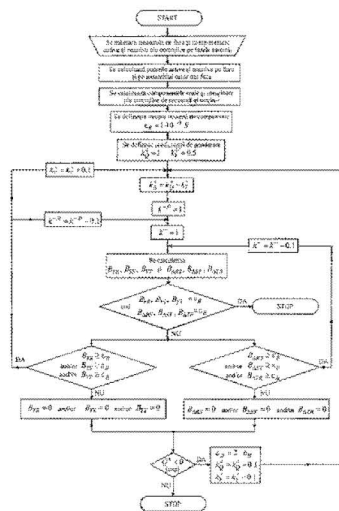


Fig. 2

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



1/2

METODĂ DE CONTROL PENTRU UN COMPENSATOR CAPACITIV AUTOMAT DESTINAT ÎMBUNĂTĂȚIRII FACTORULUI DE PUTERE ȘI ECHILIBRĂRII SARCINII ÎN REȚELE ELECTRICE TRIFAZATE CU PATRU CONDUCTOARE

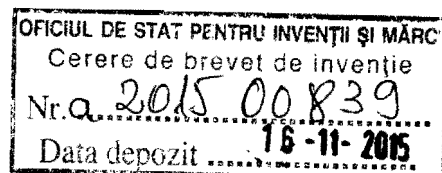
Invenția se referă la o metodă de control pentru un compensator capacitiv automat destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare. Domeniul tehnic al invenției îl constituie rețelele electrice de curent alternativ.

În scopul îmbunătățirii factorului de putere al consumatorilor (ansamblurilor de receptoare) de energie electrică din rețelele de curent alternativ, este cunoscută metoda compensării capacitive transversale, aplicată prin utilizarea de compensatoare formate din baterii de condensatoare trifazate. Acestea au una sau mai multe trepte, după cum sarcina compensată este una constantă sau variabilă în timp. În cazul bateriilor de condensatoare cu mai multe trepte, un dispozitiv de reglare automată comandă conectarea-deconectarea treptelor, urmărind obținerea unui factor de putere impus pentru ansamblul consumator-compensator. Comutația treptelor se face prin dispozitive electromagnetice (contactoare) sau cu comutație statică (tiristoare). În general compensarea se face echilibrat pe cele trei faze, astfel că metoda devine dificil de aplicat în cazul sarcinilor cu dezechilibre mari, la care poate determina chiar regimuri de supra-compensare capacitivă pe 1, 2 sau 3 faze [1÷3].

În scopul îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețelele de distribuție trifazate, este cunoscută metoda compensării reactive dezechilibrate. Această metodă este derivată din metoda de echilibrare prin compensare reactivă cu elemente pasive de circuit (montajul Steinmetz), a unei rețele trifazate cu trei conductoare ce alimentează o sarcină activă monofazată [4]. Generalizarea montajului Steinmetz pentru o sarcină trifazată dezechilibrată oarecare, alimentată într-o rețea trifazată cu patru conductoare, a condus la o structură trifazată formată din două circuite, unul în conexiune stea (Y) și celălalt în conexiune triunghi (Δ), ce conțin numai elemente reactive pasive: condensatoare (susceptanțe capacitive) și bobine (susceptanțe inductive), formând de fapt un compensator dezechilibrat de putere reactivă [5]. Pentru a răspunde variației sarcinii, aceste compensatoare au fost dezvoltate în compensatoare variabile, la care controlul se face individual pe cele 6 laturi (susceptanțe), folosind tehnologii pe bază de electronică de putere [6÷13]. Exemplul reprezentativ pentru această categorie de echipamente îl constituie compensatorul static de putere reactivă (SVC - Static VAR Compensator), conceput pentru compensare variabilă dezechilibrată. Aceste compensatoare se obțin cu costuri ridicate din cauza tehnologiilor avansate folosite pentru componentele de control-comandă dar și a bobinelor de mare putere din componența lor (câte trei pentru cele două circuite trifazate Y și Δ).

În scopul creșterii performanțelor în ceea ce privește viteza de reacție sau precizia reglajului puterii reactive de compensare, sunt cunoscute echipamentele construite cu controlere de înaltă performanță pentru sisteme electroenergetice (high-performance power system controllers). Structura acestora se bazează pe tehnologia convertoarelor cu auto-comutație (self-commutated converters) și pot fi de tip STATCOM (Static Synchronous Compensator), D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator), APF (Active Power Filter), UPQC (Unified Power Quality Conditioner) și altele [13÷15]. Pentru controlul acestor echipamente, în ultima perioadă au fost dezvoltați algoritmi performanți, uneori preluați din domeniul inteligenței artificiale [16÷20]. Deși includ tehnologii de vârf, aceste echipamente au structuri foarte complicate și sunt dificil de controlat, mai ales în aplicații industriale de puteri mari (sute sau mii de kW, zeci de MW). În plus, costurile lor fiind foarte mari, de cele mai multe ori investițiile în astfel de echipamente sunt dificil de justificat.

În scopul simplificării structurii respectiv a reducerii costurilor legate de construcția și exploatarea compensatoarelor dezechilibrate cu elemente pasive, este cunoscută structura ce conține numai condensatoare. Plecând de la constatarea că într-o multitudine de aplicații nu sunt necesare nici viteze de reacție și nici precizii foarte mari ale sistemelor de reglaj, în ultima perioadă



specialiștii s-au îndreptat spre soluții simplificate, mai avantajoase din punct de vedere tehnico-economic. O astfel de soluție se obține prin eliminarea din construcția compensatorului dezechilibrat descris mai sus, a bobinelor. Spre exemplu, în [23] și [24] autorii prezintă un model matematic și un compensator capacitiv automat dezechilibrat construit pe baza acestuia, conținând cele două circuite trifazate în conexiune Y și Δ , capabil să determine maximizarea factorului de putere și echilibrarea totală a sarcinii, indiferent de structura și natura dezechilibrului sarcinii trifazate. Ceea ce omit să precizeze autorii respectivi, este faptul că de cele mai multe ori echilibrarea totală se poate face numai cu prețul unei supra-compensări capacitive pe secvența pozitivă, cu efecte negative asupra instalațiilor, dintre care cea mai importantă se referă la creșterea riscului de producere a unor rezonanțe paralele în rețeaua de distribuție.

Aceeași soluție a utilizării compensatoarelor capacitive dezechilibrate pentru îmbunătățirea factorului de putere și echilibrarea sarcinii a fost dezvoltată și în invențiile ale căror rezumate sunt prezentate mai jos.

Este cunoscută invenția CN202930950 (U) - Benkuan, S., Luping, Z., Nan, S, Libo, E., *Automatic balancing optimal active compensation device*, care prezintă un echipament de compensare pentru echilibrarea automată optimă a puterii active. Echipamentul include un controler pentru reglarea dezechilibrului, un condensator monofazat de mare putere, un comutator multifuncțional pentru bateria de condensatoare și un întreruptor. Structura echipamentului cuprinde un aparat pentru eșantionarea curentului/tensiunii ce face parte din controlerul pentru reglarea dezechilibrului, care este conectat cu un CPU (Central Processing Unit) printr-un comutator de izolare optoelectronică și un convertor A/D (analog/digital). La CPU sunt conectate o tastatură, un ecran și o memorie de date. CPU este conectat la rețeaua externă prin interfețele de comunicație de tip RS485 și RS232. Datele calculate în CPU permit comanda comutatoarelor prin intermediul unui circuit de protecție și izolare. Autorii afirmă că prin aplicarea echipamentului de compensare pentru echilibrarea automată optimă a puterii active la compensarea dezechilibrelor curenților în sistemele trifazate, se obțin performanțe mult mai bune decât prin aplicarea echipamentelor de compensare actuale. El poate crește economia de energie cu mai mult de 30% față de un echipament de compensare obișnuit și poate fi folosit atât pentru compensare mono, bi și trifazată cât și pentru echilibrare trifazată prin reglarea automată a sarcinilor active.

Este cunoscută invenția CN104167747 (A) - Huazhong, M., Xinji, C., Suyue, X., Xuetao, F., Weizhong, J., Huigen, M., *Unbalance and reactive compensation control device for low voltage power grid*, care prezintă un echipament pentru controlul compensării puterii reactive și al dezechilibrului într-o rețea electrică de joasă tensiune. Dispozitivul de control cuprinde un modul de procesare a datelor, un modul CPU și un modul de comunicație. Obiectivul procesului de control îl constituie minimizarea pierderilor în rețea. Modulul de procesare a datelor achiziționează curenții și tensiunile din rețeaua electrică de joasă tensiune și calculează valorile efective ale acestor mărimi, apoi puterile active și reactive, factorul de putere și gradul de dezechilibru. Modulul CPU calculează mărimea compensării în conformitate cu decalajul dintre puterea reactivă și valoarea impusă a acesteia respectiv decalajul dintre gradul de dezechilibru al curentului și valoarea impusă a acesteia. Modulul CPU are la ieșire semnale de control al comutației, care sunt trimise unui echipament de comutație a bateriei de condensatoare, cu care se face compensarea în rețeaua de joasă tensiune. Echipamentul pentru controlul compensării puterii reactive și al dezechilibrului rezolvă simultan cele două probleme, permițând obținerea unei compensări optime.

Este cunoscută invenția CN203553957 (U) - Liu Jianxin L., Shaohao, Z., *Device capable of balancing threephase current*, care prezintă un echipament capabil să echilibreze curenții trifazați, făcând uz de un principiu de bază, conform căruia, conectând un condensator între două faze se produce un transfer de curent activ între fazele respective. Astfel, conectând condensatoare de diferite capacități între cele trei faze, se pot obține simultan compensarea puterii reactive și echilibrarea sarcinii active.

În invențiile de mai sus se prezintă soluții tehnice pentru compensatoare capacitive dezechilibrate automate, ce urmăresc variația sarcinii și comandă reglarea puterilor reactive ale unor baterii de condensatoare monofazate, în conexiune Δ și/sau Y, fără a se preciza însă algoritmul de reglare. Dezavantajul acestor soluții constă în aceea că simplificarea structurii compensatorului dezechilibrat prin transformarea lui într-un compensator capacitiv dezechilibrat, ca urmare a eliminării bobinelor, face ca echilibrarea totală a sarcinii să nu se poată obține decât în condițiile producerii unei supra-compensării capacitive pe secvența pozitivă, pe 1, 2 sau 3 faze ale rețelei.

Problema tehnică a invenției constă în realizarea unei metode de a optimiza valorile capacităților celor 6 baterii de condensatoare monofazate ale compensatorului capacitiv dezechilibrat, astfel încât să se obțină un factor de putere cât mai mare, adică o compensare cât mai mare a componentei reactive a curentului de secvența pozitivă al sarcinii (I_{load}^+), evitând supra-compensarea acesteia și în același timp să se obțină o echilibrare cât mai bună, adică o compensare cât mai mare a curenților de secvență negativă (I_{load}^-) și zero (I_{load}^0) ai sarcinii.

Metoda de control pentru un compensator capacitiv automat destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, conform invenției, elimină dezavantajele de mai sus prin aceea că este constituită din următoarele etape:

- definește ca fiind mărimile de intrare ale procesului de reglaj, valorile efective ale componentelor reale și imaginare ale curenților de secvență ai sarcinii, adică tocmai componentele ce trebuie să fie compensate;
- definește ca fiind mărimile de control ale procesului de reglaj, nivelurile de compensare a componentelor de secvență pozitivă, negativă și zero ale curenților de sarcină, permițând astfel controlul direct și individual al compensării pentru fiecare componentă;
- definește ca fiind mărimile de ieșire ale procesului de reglaj, cele 6 susceptanțe ale compensatorului, iar pentru calculul valorilor acestora utilizează relații analitice ce stabilesc legătura directă cu mărimile de intrare;
- efectuează secvențe de calcul în scopul obținerii unor valori negative sau nule pentru mărimile de ieșire, prin corecția iterativă a mărimilor de control, ținând cont de restricția referitoare la evitarea supra-compensării capacitive a componentei de secvență pozitivă a curenților sarcinii;
- determină valorile optime ale mărimilor de ieșire, prin distribuția puterii reactive capacitive de compensare între cele două funcții ale compensatorului: îmbunătățire factor de putere (compensarea componentei imaginare (reactive) a curentului de secvență pozitivă al sarcinii) și echilibrare (compensarea componentelor de secvență negativă și zero ai sarcinii);
- determină valorile optime ale mărimilor de ieșire, prin distribuția puterii reactive capacitive de compensare pe secvența pozitivă între cele două circuite trifazate ale compensatorului (componentele în conexiune Y respectiv Δ), din condiția minimizării numărului și valorii susceptanțelor care trebuie anulate (eliminate din circuit) ca urmare a faptului că nu pot fi aduse în domeniul capacitiv.

Metoda de control pentru un compensator capacitiv automat destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, conform invenției, prezintă următoarele avantaje:

1. permite determinarea valorilor susceptanțelor compensatorului capacitiv dezechilibrat în legătură directă chiar cu componentele de secvență ale curenților de sarcină asupra cărora se acționează (care se compensează);
2. permite controlul direct al nivelului de compensare a componentelor de secvență ale curenților de sarcină, prin ponderarea acestora în relațiile de calcul al susceptanțelor compensatorului;

3. permite controlul individual al nivelului de compensare pentru fiecare componentă de secvență a curenților de sarcină (pozitivă, negativă și zero) deci permite controlul repartiției puterii reactive capacitive între cele două funcții ale compensatorului: îmbunătățirea factorului de putere respectiv echilibrarea sarcinii;
4. permite distribuția optimă a puterii reactive de compensare pe secvența pozitivă între cele două circuite trifazate (componentele în conexiune Y respectiv Δ), astfel încât să se minimizeze numărul și valoarea susceptanțelor ce trebuie anulate (eliminate) ca urmare a faptului că nu pot fi aduse în domeniul capacitiv, minimizând astfel dezechilibrul produs de structura incompletă și determinând deci o mai bună echilibrare a sarcinii la aceeași putere reactivă capacitivă utilizată pentru compensare.

Se dă în continuare un exemplu de realizare a invenției în legătură cu figurile care reprezintă:

- Fig. 1 - Descompunerea celor două componente reale ale compensatorului, în cinci componente fictive, pentru care se calculează susceptanțele fictive;
- Fig. 2 - Schema logică simplificată a unui algoritm de aplicare a metodei de control al valorilor susceptanțelor capacitive (capacităților) din componența compensatorului capacitiv dezechilibrat automat.

Metoda de control pentru un compensator capacitiv automat destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, conform invenției, poate fi implementată prin intermediul unui program de calculator în sistemul de control al compensatorului, cu scopul distribuției optime între cele 6 baterii de condensatoare monofazate, a puterii reactive capacitive de compensare, astfel încât să se obțină maximizarea factorului de putere pe secvența pozitivă și minimizarea dezechilibrului pentru ansamblul sarcină-compensator, ținând cont de restricția de evitare a supra-compensării capacitive pe secvența pozitivă.

Metoda dezvoltată în cadrul invenției se bazează pe un modelul matematic cunoscut, asociat compensatorului dezechilibrat de putere reactivă, format din capacități și inductivități, capabil să compenseze total cele cinci componente ale curenților de secvență ai sarcinii: componenta reactivă (imaginară) a curențului de secvență pozitivă, pentru maximizarea factorului de putere ($\text{Im}(I_{load}^+) = 0$, $\cos \varphi^+ = 1$), respectiv componentele reale și imaginare ale curenților de secvență negativă și zero, pentru echilibrarea totală a sarcinii ($\text{Re}(I_{load}^-) = 0$, $\text{Im}(I_{load}^-) = 0$, $\text{Re}(I_{load}^0) = 0$, $\text{Im}(I_{load}^0) = 0$) [6], [7]. Prin dezvoltarea modelului matematic în [5], [22] și alte lucrări, se fundamentează analitic mecanismul energetic al echilibrării sarcinii active prin compensare reactivă dezechilibrată. Astfel, se demonstrează că elementele reactive ale compensatorului (bobine, condensatoare), fiind conectate între două faze (sau conexiune Δ), determină o redistribuire (transfer) a puterilor active între faze, echilibrându-le.

Pe baza aceluiași model matematic, în anumite condiții de structură a sarcinii, se poate obține maximizarea factorului de putere pe secvența pozitivă ($\cos \varphi^+ = 1$) și echilibrarea totală a sarcinii, prin compensarea curenților de secvență negativă și zero ai acesteia ($I_{load}^- = 0$, $I_{load}^0 = 0$), folosind numai susceptanțe capacitive (baterii de condensatoare) [21]. Această soluție este una deosebit de avantajoasă deoarece presupune renunțarea la susceptanțele inductive (bobine), ceea ce reduce foarte mult prețul compensatorului. De cele mai multe ori însă echilibrarea totală se poate face numai cu prețul unei supra-compensări capacitive pe secvența pozitivă, ceea ce este de neacceptat, atât din punctul de vedere al consumatorului cât și al operatorului de distribuție, așa cum s-a arătat mai sus.

Metoda, conform invenției, permite determinarea valorilor celor 6 susceptanțe capacitive, în funcție de mărimile componentelor simetrice ce trebuie compensate (suprimate sau reduse).

Relațiile de calcul utilizate în cadrul metodei s-au stabilit pe baza modelului matematic dezvoltat în [5], [22]. Ele permit descompunerea celor două componente ale compensatorului, având conexiunile Y respectiv Δ , în cinci compensatoare fictive: comp. $Y^{(+)}$, comp. $Y^{(-,0)}$, comp. $\Delta^{(+)}$, comp. $\Delta^{(-)}$, comp. $\Delta^{(-,0)}$.

Funcțiile celor 5 compensatoare fictive și relațiile de calcul ale susceptanțelor ce le alcătuiesc, sunt următoarele:

- comp. $Y^{(+)}$: formează un set de curenți de secvență pozitivă, ce compensează o primă parte din componentele reactive inductive ale curenților de secvență pozitivă ai sarcinii;

$$B_{YR}^+ = B_{YS}^+ = B_{YT}^+ = k_Y^+ \frac{1}{U} \text{Im}(I_{load}^+) \quad [S] \quad (1)$$

în care I_{load}^+ este curentul de secvență pozitivă (directă) al sarcinii iar U valoarea efectivă a tensiunii de fază;

- comp. $Y^{(-,0)}$: formează două seturi de curenți: unul compensează curenții de secvență zero ai sarcinii, celălalt compensează curenții de secvență inversă ai comp. $\Delta^{(-,0)}$;

$$B_{YR}^{-,0} = k^{-,0} \frac{2}{U} \text{Im}(I_{load}^0)$$

$$B_{YS}^{-,0} = k^{-,0} \frac{1}{U} \left[\sqrt{3} \text{Re}(I_{load}^0) - \text{Im}(I_{load}^0) \right] \quad (2)$$

$$B_{YT}^{-,0} = k^{-,0} \frac{1}{U} \left[-\sqrt{3} \text{Re}(I_{load}^0) - \text{Im}(I_{load}^0) \right]$$

în care I_{load}^0 este curentul de secvență zero (homopolară) al sarcinii;

- comp. $\Delta^{(+)}$: formează un set de curenți de secvență pozitivă, ce compensează a doua parte din componentele reactive inductive ale curenților de secvență pozitivă ai sarcinii;

$$B_{\Delta RS}^+ = B_{\Delta ST}^+ = B_{\Delta TR}^+ = k_{\Delta}^+ \frac{1}{3U} \text{Im}(I_{load}^+) \quad (3)$$

- comp. $\Delta^{(-)}$: formează un set de curenți de secvență negativă, ce compensează curenții de secvență negativă ai sarcinii;

$$B_{\Delta RS}^- = k^- \frac{1}{3U} \left[-\sqrt{3} \text{Re}(I_{load}^-) + \text{Im}(I_{load}^-) \right]$$

$$B_{\Delta ST}^- = k^- \frac{1}{3U} \left[-2 \text{Im}(I_{load}^-) \right] \quad (4)$$

$$B_{\Delta TR}^- = k^- \frac{1}{3U} \left[\sqrt{3} \text{Re}(I_{load}^-) + \text{Im}(I_{load}^-) \right]$$

în care I_{load}^- este curentul de secvență negativă (inversă) al sarcinii;

- comp. $\Delta^{(-,0)}$: formează un set de curenți de secvență negativă, ce compensează curenții de secvență negativă ai comp. $Y^{(-,0)}$.

$$\begin{aligned}
 B_{\Delta RS}^{-,0} &= k^{-,0} \frac{1}{3U} \left[-\sqrt{3} \operatorname{Re}(I_{load}^0) - \operatorname{Im}(I_{load}^0) \right] \\
 B_{\Delta ST}^{-,0} &= k^{-,0} \frac{1}{3U} \left[2 \operatorname{Im}(I_{load}^0) \right] \\
 B_{\Delta TR}^{-,0} &= k^{-,0} \frac{1}{3U} \left[\sqrt{3} \operatorname{Re}(I_{load}^0) - \operatorname{Im}(I_{load}^0) \right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

În relațiile (1)-(5), coeficienții k_Y^+ , k_Δ^+ , $k^{-,0}$ și k^- sunt introduși pentru ponderarea componentelor de secvență pozitivă, negativă și zero ai curenților de sarcină, în expresiile susceptanțelor fictive. Această ponderare are efect direct chiar asupra nivelului componentelor respective ale curenților de compensare, constituind deci modul de stabilire a nivelului de compensare.

Funcțiile compensatoarelor fictive se regăsesc, prin aplicarea principiului suprapunerii efectelor, la cele două circuite reale, pentru care valorile susceptanțelor se obțin prin punerea în paralel (însurubarea) susceptanțelor compensatoarelor fictive în conexiune Y respectiv ale compensatoarelor fictive în conexiune Δ :

$$\begin{aligned}
 B_{YR} &= B_{YR}^+ + B_{YR}^{-,0} \\
 B_{YS} &= B_{YS}^+ + B_{YS}^{-,0} \\
 B_{YT} &= B_{YT}^+ + B_{YT}^{-,0}
 \end{aligned} \tag{6}$$

respectiv

$$\begin{aligned}
 B_{\Delta RS} &= B_{\Delta RS}^+ + B_{\Delta RS}^- + B_{\Delta RS}^{-,0} \\
 B_{\Delta ST} &= B_{\Delta ST}^+ + B_{\Delta ST}^- + B_{\Delta ST}^{-,0} \\
 B_{\Delta TR} &= B_{\Delta TR}^+ + B_{\Delta TR}^- + B_{\Delta TR}^{-,0}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Cele 6 susceptanțe ale compensatorului sunt mărimile de ieșire ale procesului de reglaj condus de sistemul de control al compensatorului automat.

Valorile capacităților bateriilor de condensatoare rezultă în funcție de frecvența f a rețelei, aplicând relația cunoscută:

$$C = \frac{-B}{\omega} = \frac{-B}{2\pi f} \quad [F] \tag{8}$$

Se observă că la compensarea componentei imaginare a curentului de secvență pozitivă a sarcinii, participă atât comp. $Y^{(+)}$ cât și comp. $\Delta^{(+)}$. Valorile coeficienților k_Y^+ și k_Δ^+ se stabilesc astfel încât să nu se producă supra-compensarea (pe secvența pozitivă). Dacă se notează cu $k_Q^+ = k_Y^+ + k_\Delta^+$ nivelul permis de compensare a puterii reactive pe secvența pozitivă, rezultat din condiția evitării supra-compensării, se poate spune că prin intermediul coeficienților k_Y^+ și k_Δ^+ , se distribuie între cele două compensatoare, nivelul permis de compensare pe secvența pozitivă.

Se dă în continuare un exemplu de aplicare a metodei de control al compensatorului capacitiv automat, metodă bazată pe funcțiile celor 5 compensatoare fictive (Fig. 1) și pe relațiile de calcul ale susceptanțelor ce le alcătuiesc (1+7). Pentru controlul compensatorului se aplică o

succesiune de etape de operare, ilustrată de schema logică simplificată aferentă algoritmului de implementare a metodei (Fig. 2).

Compensatorul capacitiv dezechilibrat automat pentru îmbunătățirea factorului de putere și echilibrarea sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, la care se implementează metoda de control conform invenției, este prevăzut cu circuite de măsurare (achiziție) a tensiunilor și curenților pe cele trei faze ale sarcinii pe care o compensează. De asemenea compensatorul conține un element de calcul în care va fi implementat algoritmul de control (de exemplu un automat programabil). Elementul de calcul va determina pentru început puterile active și reactive pe fazele sarcinii și componentele reale și imaginare ale curenților de secvență ai sarcinii. Aceste mărimi, determinate prin măsurare sau calcul, se constituie în mărimile de intrare ale procesului de reglaj.

Înainte de calculul valorilor susceptanțelor ce se vor conecta pe cele șase laturi ale celor două circuite trifazate ale compensatorului (în conexiune Y respectiv Δ) se stabilește valoarea unei alte mărimi de control: corecția maximă aplicată susceptanțelor care din calcul rezultă pozitive (care se elimină din circuitele compensatorului), notată ε_B . Pentru exemplul dat $\varepsilon_B = 1 \cdot 10^{-3} S$. Se poate spune că $-\varepsilon_B$ este valoarea treptei minime de compensare.

Se stabilesc apoi valorile inițiale ale coeficienților de ponderare a curenților de compensare, care urmează să suporte un proces iterativ de corecție. Pentru început se consideră $k_Q^+ = 1$ și $k_Y^+ = 0.5$ (deci $k_\Delta^+ = 0.5$), $k^{-,0} = 1$ și $k^- = 1$. Pentru aceste valori ale coeficienților de ponderare se obțin pentru cele 6 susceptanțe reale, valorile corespunzătoare unei compensări totale a puterii reactive pe secvența pozitivă și echilibrarea totală a sarcinii. Pot fi unele situații în care toate susceptanțele rezultă negative, ceea ce conduce la oprirea procesului iterativ și apoi la comanda conectării treptelor corespunzătoare ale celor 6 baterii de condensatoare monofazate.

De cele mai multe ori însă unele susceptanțe reale rezultă pozitive, adică inductive, ceea ce trebuie corectat. Corecția se face prin modificarea iterativă a valorilor coeficienților de ponderare, deci a curenților de compensare. Mai întâi se modifică distribuția curentului de compensare pe secvența pozitivă între cele două circuite Y și Δ , păstrând aceeași valoare a lui k_Q^+ și modificând valorile k_Y^+ și k_Δ^+ în sensul micșorării cât mai mult posibil a numărului și valorii susceptanțelor pozitive. Scăderea valorii susceptanțelor pozitive sub pragul ε_B duce la deconectarea (eliminarea) laturilor respective ale compensatorului. Dacă această scădere nu este posibilă numai prin schimbarea coeficienților k_Y^+ și k_Δ^+ se micșorează și coeficienții $k^{-,0}$ și k^- , în pași succesivi. Cu cât coeficienții $k^{-,0}$ și k^- sunt mai mici cu atât efectul de echilibrare al compensării este mai redus. Eliminarea susceptanțelor rămase pozitive duce la supra-compensare capacitivă pe secvența pozitivă. Evitarea acesteia se face prin reducerea nivelului de compensare pe secvența pozitivă, deci prin micșorarea lui k_Q^+ . Procesul iterativ de corecție a coeficienților de ponderare se reia.

Coeficienții k_Y^+ , $k_Q^+(k_\Delta^+)$, $k^{-,0}$ și k^- sunt deci mărimile de control ale procesului.

Pentru sarcini având un nivel ridicat de dezechilibru, în procesul iterativ se poate recurge și la creșterea pragului ε_B .

În baza considerațiilor prezentate mai sus, metoda poate fi implementată sub forma unui program de calculator, într-un automat programabil care include funcția de control al compensatorului. Această funcție este realizată prin comanda comutației treptelor celor 6 baterii de condensatoare monofazate și se obține prin derularea următoarelor etape principale de operare (Fig. 2):

- se determină prin măsurare și calcul mărimile de intrare: tensiunile de fază, componentele active și reactive ale curenților, puterile active și reactive, factorul de putere, componentele reale și imaginare ale curenților de secvență ai sarcinii;
- se definește valoarea inițială a mărimii de control prin care se stabilește treapta minimă de compensare capacitivă: ε_B ;
- se definesc valorile inițiale ale mărimilor de control prin care se stabilesc nivelul de compensare pe secvența pozitivă : k_Q^+ (k_Δ^+) și k_Y^+ , respectiv nivelul de compensare pe secvența negativă și zero: k^{-0} și k^- ;
- se calculează valorile inițiale ale mărimilor de ieșire: cele 6 susceptanțe ale compensatorului;
- se derulează un proces de calcul iterativ, pentru obținerea unor valori negative sau nule pentru mărimile de ieșire, constând în corecția distribuției compensării pe secvența pozitivă între componentele Y și Δ și/sau în corecția nivelului de compensare a componentelor de secvență pozitivă, negativă și zero, respectiv, dacă este necesar, în corecția valorii treptei minime de compensare, în condițiile evitării supra-compensării capacitive a componentei de secvență pozitivă.

Rezultatul fiecărui ciclu de reglaj este un compromis între cele două tendințe contradictorii: utilizarea unei puteri reactive capacitive de compensare cât mai mari în scopul obținerii unui nivel cât mai ridicat de echilibrare a sarcinii (de compensare pe secvența negativă și zero), respectiv limitarea puterii reactive capacitive de compensare, pentru evitarea supra-compensării capacitive pe secvența pozitivă.

În toate situațiile practice, un astfel de compensator, pe lângă îmbunătățirea factorului de putere, determină și o reducere, mai mare sau mai mică, uneori totală a dezechilibrului sarcinii, ceea ce îl face întotdeauna mai util decât un compensator „clasic”, care nu are această funcție suplimentară.

BIBLIOGRAFIE

- [1] SR EN 61.921 (CEI 61.921) - *Condensatoare de putere. Baterii de condensatoare pentru compensarea factorului de putere la joasă tensiune;*
- [2] IEC 60.871 - *Condensatoare sunt pentru rețeaua de curent alternativ cu tensiuni superioare de 1000 V;*
- [3] PE 120-94 - *Normativ Compensarea Puterii Reactive;*
- [4] UIE [International Union for Electroheat], Power Quality Working group WG2, *Guide to quality of electrical supply for industrial installations, Part 4: Voltage unbalance*, January 1998;
- [5] Buta, A., Pană, A., *Simetrizarea sarcinii rețelelor electrice de distribuție*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000;
- [6] Gyugyi, L., Otto, R., Putman, T., *Principles and Applications of Static Thyristor-Controlled Shunt Compensators*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-97, October 1980, No. 5, pp. 1935-1945.
- [7] Gueth, G., Enstedt, P., Rey, A., Menzies, R., W., *Individual phase control of a static compensator for load compensation and voltage balancing*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, 1987, pp. 898-904.
- [8] San, Y., L. & Chi, J., W., *On-line reactive power compensation schemes for unbalanced three phase four wire distribution feeders*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, 1993, pp. 1958-1965
- [9] Czarnecki, L., S. & Hsu, S., M., *Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions*, IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 141, No. 4, 1994, pp. 177-185
- [10] Lee S.-Y, Wu C.-J., *Reactive power compensation and load balancing for unbalanced three-phase four-wire system by a combined system of an SVC and a series active filter*, IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2000: 563-578;
- [11] Mayordomo, J., G., Izzeddine, M., Asensi, R., *Load and Voltage Balancing in Harmonic Power Flows by Means of Static VAr Compensators*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, July 2002, pp. 761-769;
- [12] Grünbaum, L., Petersson, A., Thorvaldsson, B., *FACTS improving the performance of electrical grids*, ABB Review (Special Report on Power Technologies), Year 2003, pp. 13-18;
- [13] Dixon, J., Morán, L., Rodríguez, J., Domke, R., *Reactive Power Compensation Technologies, State-of-the-Art Review*, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 12, December 2005, pp. 2144-2164;
- [14] Singh B, Jayaprakash P., Kothari D., P., *Isolated H-Bridge VSC Based 3-Phase 4-Wire DSTATCOM for Power Quality Improvement*, IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2008: 366-371.
- [15] Singh B, Jayaprakash P, Kothari D., P., *Three Single-Phase Voltage Source Converter Based Three-phase four-wire DSTATCOM*, International Conference on Power Systems (ICPS), 2009: 1-5.
- [16] Said, I., K., Pirouti, M., *Neural network-based Load Balancing and Reactive Power Control by Static VAR Compensator*, International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, April 2009, pp. 25-31.
- [17] Zadeh., J., K., Farjah E., *New Control Technique for Compensation of Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Systems*, IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009: 1-6.

- [18] Singh, B., Kumar, S., *Modified Power Balance Theory for Control of DSTATCOM, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, 2010: 1-8.
- [19] Da Silva, S., A., O., Modesto, R., A., Goedel, A., Nascimento, C., F., *Compensation Algorithms Applied to Power Quality Conditioners in Three-Phase Four-Wire Systems*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010: 730-735.
- [20] Singh, B., Kumar, S., Kothari, D., P., *Implementation of Neural-Network-Controlled Three-Leg VSC and a Transformer as Three-Phase Four-Wire DSTATCOM*, IEEE Trans. On Industry Applications, 47(4): 1892 - 1901, 2011.
- [21] Pană, A., Băloi, Al., Molnar-Matei, F., *Load Balancing by Unbalanced Capacitive Shunt Compensation – A Numerical Approach*, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010: 1-6;
- [22] Pană, A., *Active load balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation*, Chapter 11 in *Power Quality -Monitoring, Analysis and Enhancement*, edited by Zobaa A.F., Manana Canteli M., Bansal R., InTech, Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, 2011;
- [23] Zhou, J., Sun, Q, Zhang, H., Zhao, Y., *Load Balancing and Reactive Power Compensation based on Capacitor Banks Shunt Compensation in Low Voltage Distribution Networks*, Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, July 25-27, 2012, Hefei, China, pp 6681-6686;
- [24] Sun, Q., Zhou, J., Liu, X., Yang, J., *A Novel Load-Balancing Method and Device by Intelligent Grouping Compound Switches-Based Capacitor Banks Shunt Compensation*, Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2013, Article ID 347361, 11 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/347361>;

REVENDICĂRI

1. Metoda de control pentru un compensator capacitiv automat destinat îmbunătățirii factorului de putere și echilibrării sarcinii în rețele electrice trifazate cu patru conductoare, implementată prin intermediul unui program de calculator în sistemul de control al compensatorului, **caracterizată prin aceea că:**

- definește ca fiind mărimi de intrare ale procesului de reglaj, valorile efective ale componentelor reale și imaginare ale curenților de secvență ai sarcinii, adică tocmai componentele ce trebuie compensate;
- definește ca fiind mărimi de control ale procesului de reglaj, nivelurile de compensare a componentelor de secvența pozitivă, negativă și zero ale curenților de sarcină, permițând astfel controlul direct și individual al compensării pentru fiecare componentă;
- definește ca fiind mărimi de ieșire ale procesului de reglaj, cele 6 susceptanțe ale compensatorului, iar pentru calculul valorilor acestora utilizează relații analitice ce stabilesc legătura directă cu mărimile de intrare;
- utilizează în procesul de reglaj o succesiune de etape de operare în scopul obținerii unor valori negative sau nule pentru mărimile de ieșire, prin corecția iterativă a mărimilor de control, ținând cont de restricția referitoare la evitarea supra-compensării capacitive a componentei de secvență pozitivă a curenților sarcinii;
- realizează reglajul susceptanțelor compensatorului astfel încât să se obțină o distribuție optimă a puterii reactive capacitive de compensare între cele două funcții ale compensatorului: îmbunătățire factor de putere (compensarea componentei imaginare (reactive) a curentului de secvență pozitivă al sarcinii) și echilibrare (compensarea componentelor de secvență negativă și zero ai sarcinii);
- realizează distribuția optimă a puterii reactive capacitive de compensare pe secvența pozitivă între cele două circuite trifazate ale compensatorului (componentele în conexiune Y respectiv Δ), din condiția minimizării numărului și valorii susceptanțelor care trebuie anulate (eliminate din circuit) ca urmare a faptului că nu pot fi aduse în domeniul capacitiv.

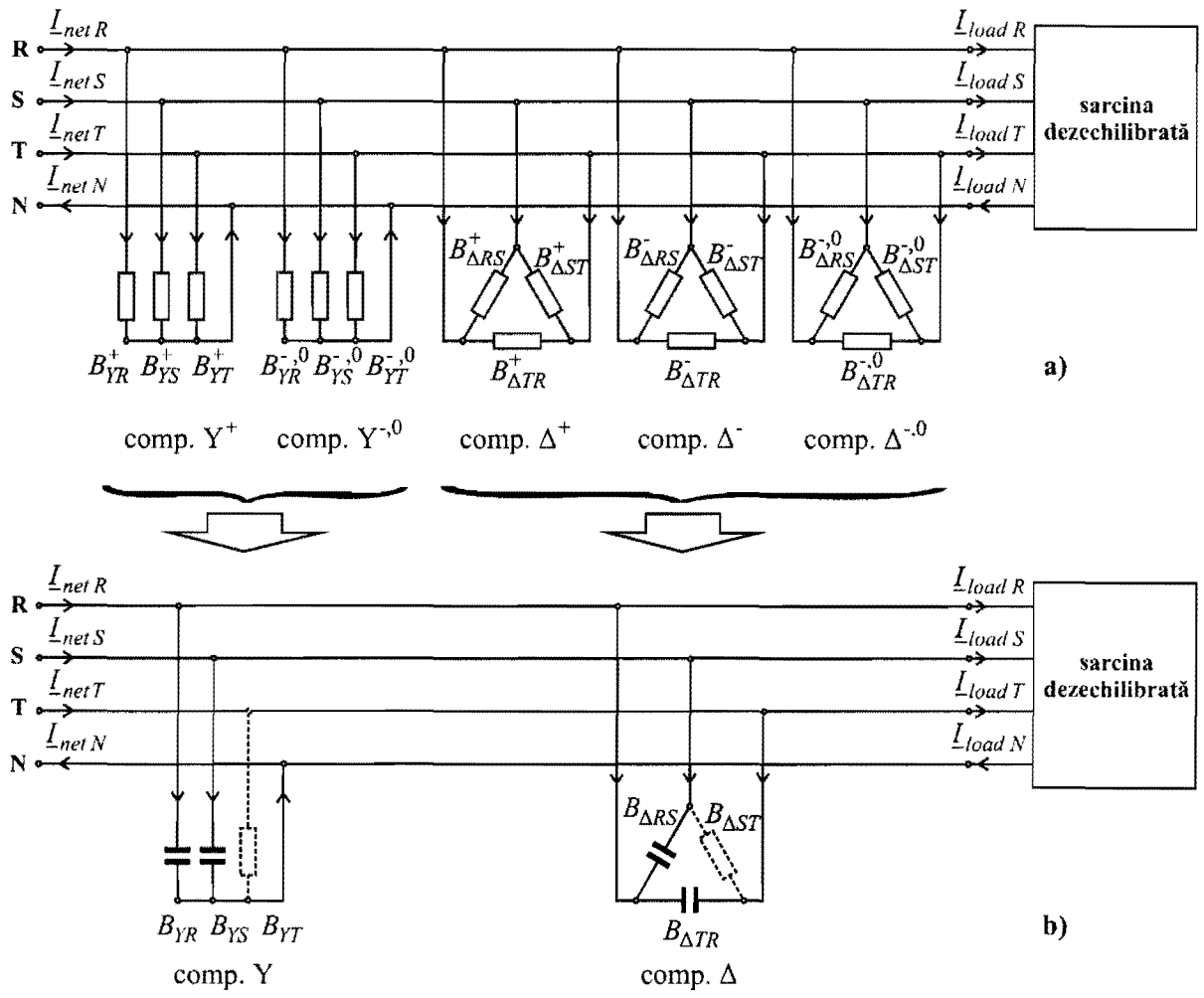


Fig. 1

16 -11- 2015

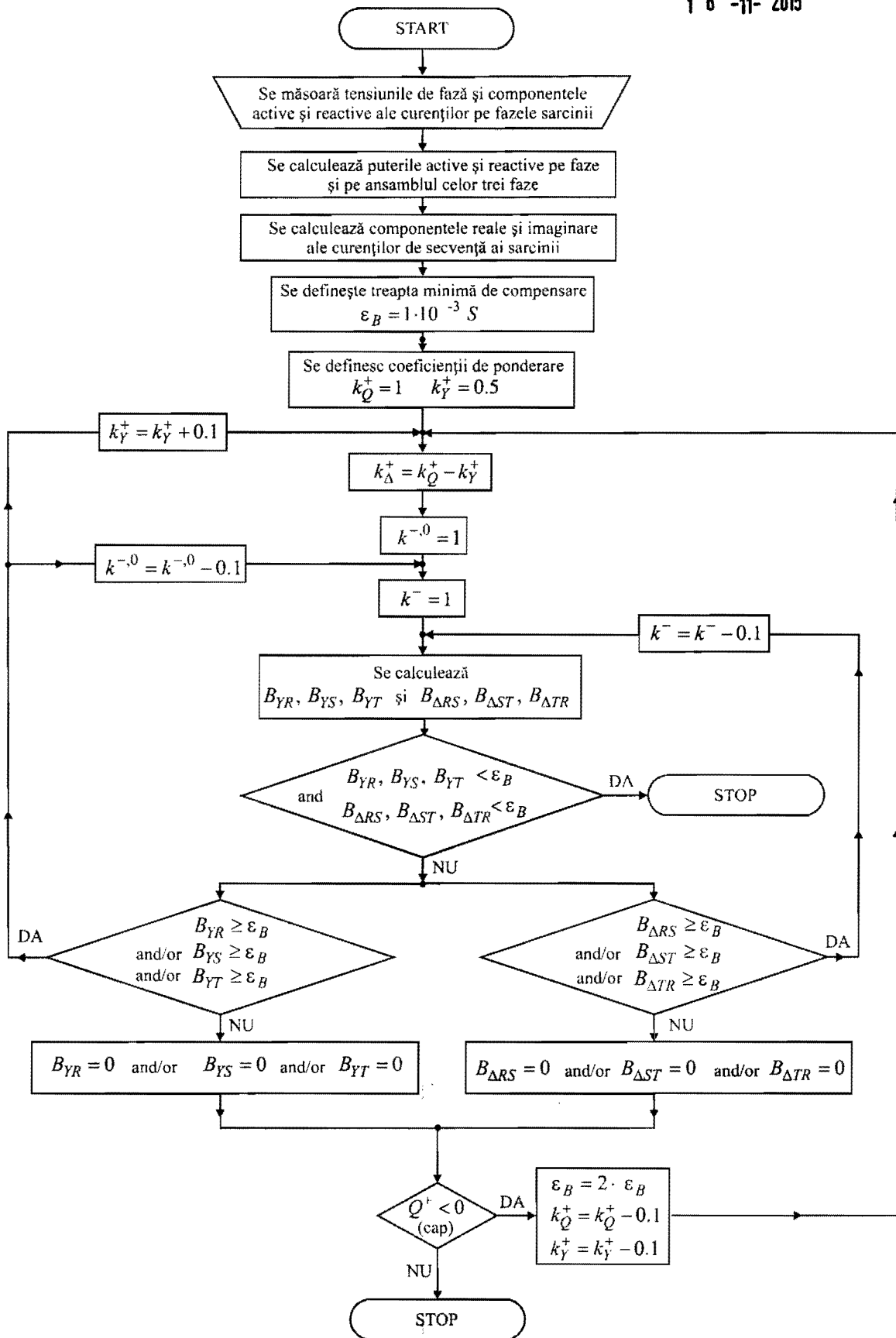


Fig. 2