



ANALIZĂ PRIN SIMULARE ATP A NIVELULUI SUPRATENSIUNILOR DE COMUTAȚIE ÎNTR-O REȚEA DE TRANSPORT A ENERGIEI ELECTRICE

Marcel Istrate, Mircea Gușă și Claudiu Bucă

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași, Facultatea de Electrotehnică

Rezumat – În lucrare sunt prezentate rezultate ale simulării ATP a unor secvențe de regimuri tranzitorii generate de producerea unor defecte și de funcționarea automatizării, într-o rețea de transport a energiei electrice. Sunt analizate nivelurile supratensiunilor de comutație specifice reanclanșării automate rapide, monofazate și trifazate, inițiate de producerea unor scurtcircuite monofazate, precum și deconectarea nesincronă după producerea unor scurtcircuite polifazate.

Keywords – Simulare ATP, supratensiuni de comutație

1. INTRODUCERE

Nivelul supratensiunilor tranzitorii din rețelele de transport a energiei electrice reprezintă date de intrare esențiale în calculele de coordonare a izolației acestora. În literatura de specialitate sunt făcute numeroase referiri la tipurile regimurilor tranzitorii generatoare de supratensiuni periculoase pentru izolația instalațiilor electrice, la diferite niveluri de tensiuni nominale [1], [2].

Pentru absolut toate instalațiile electrice de exterior, regimul tranzitoriu electromagnetic caracterizat prin cel mai înalt nivel al supratensiunilor este cel generat de descărcările de trăsnet. Abordarea unei întregi rețele, fie ea de transport sau de distribuție a energiei electrice, din punctul de vedere al comportării ei la supratensiuni atmosferice, nu se justifică și nu ar putea fi făcută decât în condițiile adoptării unui număr mare de ipoteze simplificatoare. Într-o primă etapă, este suficient să se analizeze tronsoane scurte de linii electrice aeriene, de diferite tipuri constructive, pentru determinarea nivelurilor celor mai probabile ale supratensiunilor de trăsnet ce se propagă până în instalațiile complexe ale stațiilor de transformare. Într-o a doua etapă, se poate analiza regimul tranzitoriu generat de excitarea circuitului complex al unei stații de transformare de către undele de supratensiune provenite de pe liniile electrice aeriene conectate la aceasta. În acest fel, analiza comportării unei rețele la supratensiuni de trăsnet se reduce la studii pe elemente ale acesteia, cele mai importante fiind cele efectuate la nivelul stațiilor de transformare.

O a doua categorii de supratensiuni tranzitorii este aceea a supratensiunilor de comutație. Dacă regimul tranzitoriu este efectul unei manevre voite, nivelul supratensiunilor este relativ redus, cu atât mai mult cu cât sunt luate, în prealabil, toate măsurile de diminuare a suprasolicitării izolației rețelei [1], [2]. Majoritatea regimurilor tranzitorii generatoare de supratensiuni de comutație sunt datorate, însă, producerii unor defecte și funcționării, în consecință, a automatizării de sistem. Există, ast-

fel, riscul producerii unui defect sau funcționării echipamentului de comutație în cele mai defavorabile condiții inițiale, în ceea ce privește nivelul supratensiunilor [1], [2]. În aceste condiții, fenomenul poate evolua către avarii majore, chiar de tipul celor ce au scos din funcțiune întregi sisteme electroenergetice, considerate, anterior, ca având o siguranță mare în exploatare [3].

Dacă nivelul supratensiunilor de trăsnet este suficient să fie analizat pe circuitele componente ale unei rețele, nivelul supratensiunilor de comutație trebuie analizat pe ansamblul acesteia, structura rețelei și schema operativă a acesteia fiind parametri esențiali în producerea supratensiunilor de anumit nivel, pentru o secvență dată de regimuri tranzitorii. De asemenea, dacă analiza comportării la supratensiuni de trăsnet se justifică atât în rețelele de distribuție a energiei electrice cât și în cele de transport, analiza nivelului supratensiunilor de comutație nu este justificată decât în rețelele de transport, lungimea relativ mare a liniilor fiind un factor determinant al nivelului supratensiunilor [1], [2].

Datorită importanței pe care o are stabilirea nivelului supratensiunilor de comutație, în literatura de specialitate au fost publicate modele matematice pentru abordarea diferitelor regimuri generatoare de supratensiuni de comutație, rezultate ale modelării analitice, fizice și, mult mai rar, rezultate ale unor experimente în rețelele reale.

Abordările analitice s-au rezumat la scheme relativ simple, modelele matematice fiind obținute pe baza unui număr relativ mare de ipoteze simplificatoare, astfel încât să poată fi soluționate cu un aparat matematic uzual. De exemplu, în [4] sunt date relațiile de calcul ale tensiunilor dintre faze, la sfârșitul unei linii lungi, în procesul de reconectare a acesteia la o sursă de putere finită, în condițiile neglijării tuturor pierderilor:

$$u_{12;31}(t) = \sqrt{3} \left\{ A_{st} \cos \left(\omega t + \varphi \mp \frac{\pi}{3} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \left[\cos \left(\varphi \mp \frac{\pi}{3} \right) \cdot \right. \right. \quad (1)$$

$$\left. \cdot \cos \omega_k t - \frac{\omega}{\omega_k} \sin \left(\varphi \mp \frac{\pi}{3} \right) \sin \omega_k t \right\} \pm \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \cos \omega_k t;$$

$$u_{23}(t) = \sqrt{3} \left[-A_{st} \cos(\omega t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k (\sin \varphi \cos \omega_k t - \right. \quad (2)$$
$$\left. - \frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \sin \omega_k t) \right] + 2 \sum_{k=1}^{\infty} D_k \cdot \cos \omega_k t;$$

în care cantitățile notate cu A_{st} , A_k , B_k și D_k sunt dependente de parametrii schemei echivalente a rețelei, au

semnificația unor amplitudini ale componentelor regimului tranzitoriu și sunt date de relații de forma:

$$A_{st} = E_{ech} \left[\frac{L}{L_2} \cos \tau \omega - \left(\frac{L_1 \omega}{Z} - \frac{Z}{L_2 \omega} \right) \sin \tau \omega \right]; \quad (3)$$

$$A_k = \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \cdot 2E_{ech} \left[\frac{L}{L_2} \left(\cos \tau \omega_k + \frac{\tau \omega_k}{\sin \tau \omega_k} \right) + \frac{2Z}{L_2 \omega_k} \sin \tau \omega_k \right]; \quad (4)$$

$$B_k = \frac{2E_{ech} \cdot \left(\cos \tau \omega_k - \frac{L_2 \omega_k}{Z} \sin \tau \omega_k - 1 \right)}{\frac{L}{L_2} \left(\cos \tau \omega_k + \frac{\tau \omega_k}{\sin \tau \omega_k} \right) - \frac{2Z}{L_2 \omega_k} \sin \tau \omega_k}; \quad (5)$$

$$D_k = \frac{2E_{ech} \cdot \left(\frac{L_1}{L_2} \cos \tau \omega_k + \frac{Z}{L_2 \omega_k} \sin \tau \omega_k + 1 \right)}{\frac{L}{L_2} \left(\cos \tau \omega_k + \frac{\tau \omega_k}{\sin \tau \omega_k} \right) + \frac{2Z}{L_2 \omega_k} \sin \tau \omega_k}. \quad (6)$$

Notațiile utilizate în (1) ÷ (6) au următoarea semnificație: φ - faza inițială a tensiunii; L_1 , L_2 și L - inductivitățile echivalente ale circuitelor de la extremitățile liniei și respectiv suma acestora; Z - impedanța caracteristică a liniei fără pierderi; E_{ech} - tensiunea electromotoare echivalentă; τ - durata de propagare a undelor electromagnetice pe linia având o anumită lungime; ω - pulsația corespunzătoare componentei fundamentale; ω_k - pulsația componentei libere de ordin k , care se determină ca soluție a unei ecuații transcendente [4].

În rețelele de transport a energiei electrice, având scheme complex buclate, singura metodă viabilă, atât din punct de vedere tehnic cât și economic, pentru efectuarea unei analize asupra nivelului supratensiunilor de comutație este aceea a simulării secvențelor de regimuri tranzitorii electromagnetice generatoare de astfel de supratensiuni. În condițiile în care, actualmente, există o serie de aplicații software destinate modelării rețelilor electrice și efectuării de analize de regim, ATP-EMTP (Alternative Transient Program) rămâne unul dintre cele mai puternice programe destinate analizei regimurilor tranzitorii, din următoarele considerente:

- modelare precisă a elementelor componente ale rețelilor electrice;
 - multiple posibilități de modelare, utilizatorul putând opta pentru modelul adecvat regimului ce urmează a fi simulat;
 - simulare relativ comodă a unor succesiuni de regimuri tranzitorii, fără a fi necesară determinarea explicită a condițiilor inițiale ale fiecărui regim al secvenței;
 - posibilitatea realizării de modele ale sistemelor de protecție care, asociate modelelor de rețea, permit efectuarea de simulări în concordanță cu evenimentele reale;
 - concordanță bună între rezultatele simulărilor și acelea ale înregistrărilor din rețelele reale.
- Regimurile tranzitorii susceptibile de a determina supratensiuni de comutație importante, în rețelele de transport a energiei electrice, sunt [1], [2]:
- conectarea sau reconectarea unei linii aflate în gol;
 - deconectarea unei linii aflate în gol, în condițiile reaprinderii arcului electric dintre contactele întrerupătorului care efectuează comutația;

- producerea unor nesimetrii transversale și/sau longitudinale;

- deconectarea trifazată a liniilor cu defect.

Funcționarea sistemelor de protecție, efect al producerii unor defecte, implică o succesiune de regimuri tranzitorii care includ, practic, toate regimurile enumerate anterior. Astfel, prezintă importanță analiza unor secvențe, precum:

- contornarea monofazată a izolației liniei, în condițiile întreținerii arcului electric de defect de un curent de frecvență industrială, urmată de eliminarea defectului prin funcționarea automată de reanclanșare rapidă (RAR), monofazată (RARM) sau trifazată (RART);

- producerea unui defect monofazat permanent, urmată de încercarea nereușită de eliminare a acestuia prin reanclanșare automată rapidă de tip RARM sau RART;

- producerea unui scurtcircuit polifazat, urmată de deconectarea definitivă, însă nesincronă, a liniei cu defect.

Este cunoscut faptul că cel mai înalt nivel al supratensiunilor de comutație se înregistrează în procesul de deconectare a unei linii lungi aflate în gol, dar numai dacă se reaprinde arcul electric dintre contactele întrerupătorului care efectuează manevra [1], [2]. Practic, acest regim este similar regimului de reconectare a liniei în secvența de RAR, inițiată de producerea unui defect monofazat pasager și în condițiile în care cele două întrerupătoare, de la extremitățile liniei, nu acționează sincron. Condițiile ideale ale acționării sincrone a întrerupătoarelor de la extremitățile liniei determină valori semnificativ mai mici ale supratensiunilor decât în cazul acționării nesincrone a acestora [5]. Chiar dacă sistemele de acționare ale întrerupătoarelor moderne se caracterizează prin dispersii foarte mici ale timpilor de acționare, acționarea sincronă a întrerupătoarelor de la extremitățile unei linii este puțin probabilă, măcar și din considerente de dispersie a procesului de extincție a arcului electric.

În succesiunea de regimuri tranzitorii generate de funcționarea automată de reanclanșare rapidă, este de așteptat ca cele mai mari supratensiuni să se producă la reconectarea liniei. În cazul unei acționări nesincrone, supratensiunile maxime se produc în momentul reanclanșării întrerupătorului mai rapid și se înregistrează pe partea dinspre linie a întrerupătorului mai lent.

2. MODELUL ATP AL REȚELEI

Autorii și-au propus efectuarea unei analize a nivelului supratensiunilor de comutație, generate de producerea unor defecte și de funcționarea automată de sistem, în rețeaua de 220/400 kV din zona estică a României, a cărei schemă monofilară este redată în fig. 1.

Rețeaua analizată este un subsistem al sistemului electroenergetic și este conectată la acesta prin intermediul stațiilor de transformare A, B, E, F și N. În aceste noduri s-au modelat surse trifazate de tensiune constantă, echilibrate, având impedanța internă calculată funcție de puterea de scurtcircuit corespunzătoare stațiilor de transformare menționate [6].

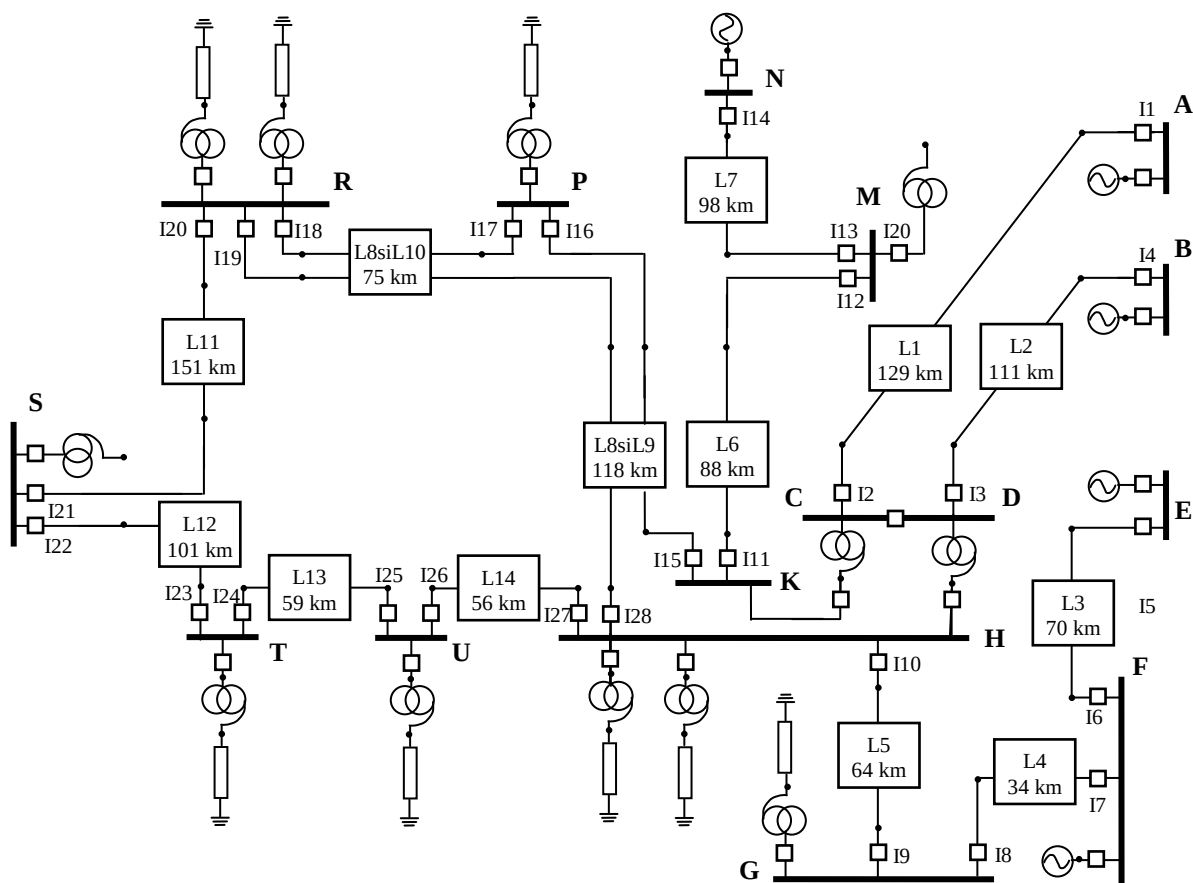


Fig. 1 – Schema monofilară a rețelei de 220/400 kV analizate

Singurele linii electrice care funcționează la tensiunea de 400 kV sunt liniile *L1* și *L2*, restul funcționând la tensiunea de 220 kV, chiar dacă unele sunt în construcție de 400 kV. Liniile *L8*, *L9* și *L10* modelează, de fapt, o linie dublu circuit, la unul dintre circuite fiind racor-dată stația de transformare *P*.

Toate liniile rețelei au fost modelate prin lanțuri de multipoli trifazați [6], [7], astfel încât să poată fi efectuată și o analiză parametrică funcție de locul producerii defectului. Utilizarea unor multipoli echivalenți de tip „IP”, cu parametri uniform distribuiți, permite efectuarea de analize de tip calitativ, referitoare la propagarea undelor de supratensiune, pe lângă analiza cantitativă, referitoare la nivelul supratensiunilor. Totuși, datorită unor limite actuale ale programului nu pot fi utilizați foarte mulți astfel de multipoli [7]. Analiza dependenței nivelului supratensiunilor funcție de locul producerii defectului implică realizarea mai multor fișiere sursă, cu toate dificultățile care derivă din aceasta. Acesta este motivul pentru care s-a optat pentru varianta modelării liniilor prin lanțuri de multipoli trifazați cu parametri concentrați, adecvați pentru analiza regimurilor generatoare de supratensiuni de comutație [6], cărora nu le este specifică existența unor componente de frecvență foarte înaltă. Prin structura internă a acestor multipoli, sunt luate în considerare toate cuplajele dintre faze, influența efectului pelicular asupra valorii parametrilor electrici longitudinali, nesimetria dată de dispunerea conductoarelor active, precum și influența prezenței conducto-

relor de protecție asupra parametrilor liniei [7].

Toate autotransformatoarele rețelei au înfășurare terțiară de medie tensiune, putând fi utilizat modelul de transformator trifazat cu reluctanță homopolară mică [7]. Caracteristica de magnetizare a tuturor autotransformatoarelor este considerată ca fiind lineară pe întreg domeniul de tensiuni ce pot să apară pe durata simulării.

Fiecărui autotransformator îi sunt asociate circuite pentru modelarea sarcinii. Acestea modelează consumatori simetrici, având puteri cuprinse între 30 ÷ 40 % din puterea nominală a înfășurărilor principale. În înfășurările terțiare sunt conectate circuite simple, prin intermediul cărora se stabilește o referință unică pentru toate nodurile înfășurărilor având conexiunea în triunghi [7].

Față de modelarea clasică, programul ATP permite introducerea, în schema electrică echivalentă, a unor întrerupătoare. Prin intermediul acestora pot fi simulate, într-o manieră simplă, diverse regimuri tranzitorii, fără a face observații suplimentare cu privire la condițiile inițiale ale fiecărui regim dintr-o secvență dată. Întrerupătoarele pot fi comandate prin intermediul unor semnale generate de modelele protecțiilor, obținându-se, astfel, modele flexibile ale rețelelor electrice. În același timp, însă, în cazul în care secvența de regimuri este bine cunoscută sau atunci când se urmărește simularea unui regim în anumite condiții inițiale, este preferabil să fie utilizate întrerupătoare de tipul celor „controlate în timp” [7], pentru care programatorul trebuie să introducă momentele de acționare.

De exemplu, în fig. 2 se dă secvența de acționare a

întrerupătorului care simulează defectul și a întrerupătoarelor de linie în cazul reanlansării automate.

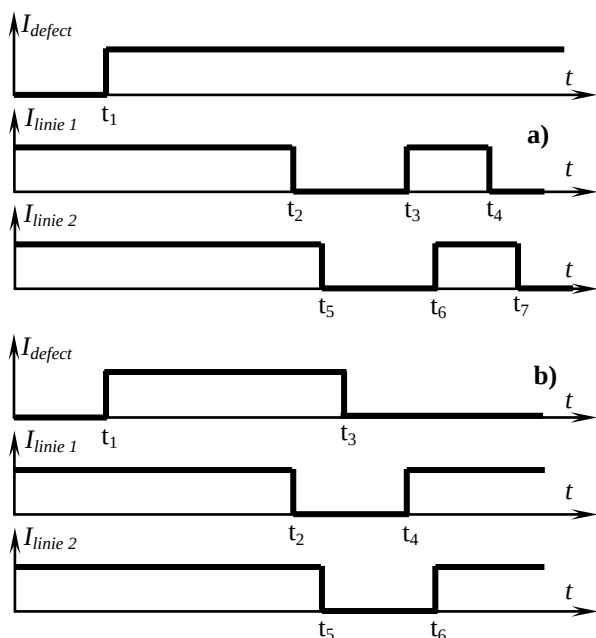


Fig. 2 – Secvențe de acționare a întrerupătoarelor de linie și a celui care simulează scurtcircuitul monofazat: a) RAR nereușită; b) RAR reușită

Momentul t_1 este ales astfel încât tensiunea pe faza cu defect, în momentul producerii acestuia, să treacă prin valoarea de vârf. Intervalele $t_1 - t_2$ și $t_1 - t_5$ corespund declanșării nesincrone a întrerupătoarelor de linie, ca efect al funcționării protecțiilor maxime temporizate de curent, la extremitățile acestora. Chiar dacă reprezentarea nu este la scară, acestea sunt, practic, egale cu intervalele de timp $t_3 - t_4$ și respectiv $t_6 - t_7$ din cazul secvenței de RAR nereușit. Toate aceste intervale de timp pot fi perfect egale cu acelea reale. Pauza de RAR, corespunzătoare intervalelor $t_2 - t_3$ și $t_5 - t_6$ – în cazul secvenței de RAR nereușit și respectiv $t_2 - t_4$ și $t_5 - t_6$ – în cazul secvenței de RAR reușit, nu este necesar să fie simulată pe toată durata ei, deoarece rezultă fișiere de date exagerat de mari. Pauza de RAR este suficient să fie simulată numai pentru acel interval de timp în care regimul se stabilizează. Așa cum se poate observa din fig. 3, acest interval de timp este de aproximativ 70 ms, în condițiile în care pauza de RAR a primului ciclu este de ordinul sutelor de ms.

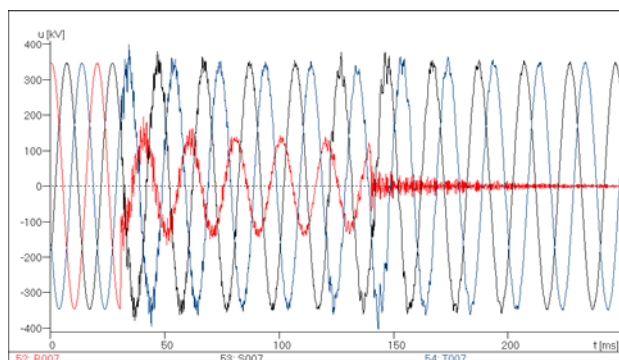


Fig. 3 – Tensiuni de fază în cazul producerii unui scurtcircuit pe linia $L1$, urmat de deconectarea fazei

3. REZULTATE. COMENTARII

Analiză parametrică a nivelului supratensiunilor este realizată pentru cele mai defavorabile condiții, atât în ceea ce privește momentul producerii defectului și sincronismul în acționarea întrerupătoarelor de la extremitățile liniei cu defect, cât și în ceea ce privește momentul reconectării liniei, astfel:

- scurtcircuitul se produce în momentul trecerii tensiunii, pe faza cu defect, prin valoarea de vârf;
- reconectarea are loc numai atunci când pe fazele sănătoase tensiunea, pe partea sursei, trece prin valoarea de vârf și este de semn contrar tensiunii reziduale a liniei;
- nesincronismul în acționarea întrerupătoarelor de la extremitățile liniei cu defect este un multiplu al perioadei tensiunii de alimentare, astfel încât să se păstreze cele mai defavorabile condiții și la acționările întrerupătorului mai lent.

3.1 RARM nereușită

Pentru acest caz, secvența de regimuri tranzitorii este:

- producerea unui scurtcircuit monofazat permanent;
- declanșarea nesincronă a polilor de întrerupător ai fazei cu defect;
- reanlansarea nesincronă a polilor de întrerupător care au simulat anterioara declanșare;
- declanșarea definitivă și nesincronă a întrerupătoarelor de la extremitățile liniei.

Un exemplu de evoluție în timp a tensiunilor de fază este redat în fig. 4, corespunzător producerii unui scurtcircuit monofazat pe faza A a liniei $L1$, la o distanță de

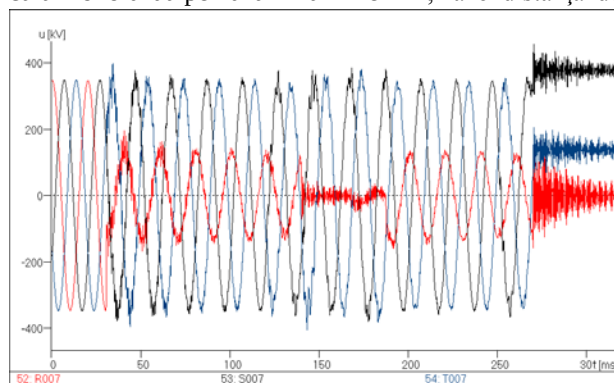


Fig. 4 - Tensiuni de fază pe linia cu defect, pentru o secvență de RARM nereușită

În momentul producerii scurtcircuitului nivelul supratensiunilor, pe fazele sănătoase, nu este important, iar durata regimului liber, caracterizat de existența armonicele superioare, este de $5 \div 6$ perioade ale tensiunii alternative de frecvență industrială. Atât în momentul deconectării liniei, cât și al reconectării acesteia nivelul supratensiunilor este aproximativ egal cu cel rezultat la producerea defectului. La deconectarea definitivă a liniei, regimul de egalizare a tensiunilor reziduale poate determina o ușoară creștere a supratensiunii, pe una dintre

fazele sănătoase. Pe barele stațiilor de transformare, așa cum este de așteptat, nu se observă tensiunile reziduale de pe linie datorită existenței conexiunii la altă sursă. În fig. 5 este reprezentată evoluția în timp a curentului de defect pentru secvența de RAR nereușit pe linia L1, la o distanță de 80 % din lungimea liniei, în raport cu barele stației A.

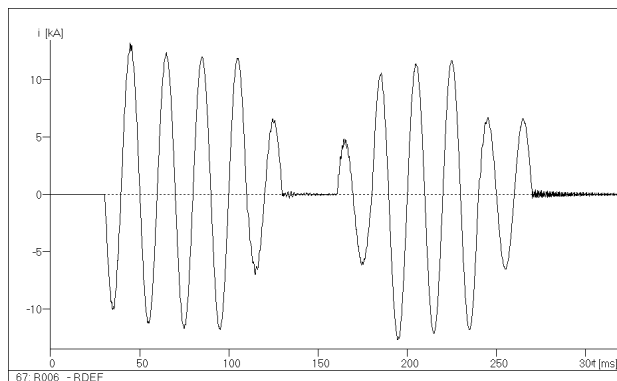


Fig. 5 – Evoluția în timp a curentului de defect, la locul producerii acestuia, pentru RAR nereușită

Se observă existența componentei aperiodice a curentului de scurtcircuit, componentă complet atenuată în 4÷5 perioade ale tensiunii de frecvență industrială. Pentru cele două regimuri în care linia cu defect este alimentată se observă opoziția de polaritate a componentei aperiodice a curentului de scurtcircuit. Aceasta se explică prin faptul că este simulată producerea defectului atunci când tensiunea, pe faza cu defect, trece prin valoarea de vârf negativă, iar reconectarea pe defect este simulată la acel moment de timp la care tensiunea fazei respective trece prin valoarea de vârf pozitivă. De asemenea, se poate observa reducerea valorii curentului de defect atunci când linia rămâne alimentată numai la unul dintre capete, prin funcționarea nesincronă a întrerupătoarelor. În tabelul 1 sunt date câteva rezultate ale simulării secvenței de RARM nereușit, în diferite puncte ale rețelei analizate. Rezultatele reprezintă factorii maximi de supratensiune, obținuți prin raportare la valoarea de vârf a tensiunii de fază corespunzătoare tensiunii celei mai ridicate a rețelei.

Tabelul 1 – Factori de supratensiune – RARM nereușită

Faza	Factor maxim de supratensiune în stația [u.r.]						
	A	C	H	F	M	R	S
Defect pe L1 situat la 25 % din lungime, în raport cu A							
A	1,276	1,128	1,140	1,161	1,140	1,161	1,233
B	1,379	1,439	1,399	1,282	1,308	1,308	1,386
C	1,210	1,334	1,146	1,279	1,369	1,279	1,390
Defect pe L1 situat la 50 % din lungimea acesteia							
A	1,224	1,298	1,261	1,132	1,188	1,289	1,470
B	1,335	1,404	1,244	1,168	1,224	1,208	1,296
C	1,341	1,349	1,308	1,217	1,400	1,211	1,373
Defect pe L7 situat la 80 % din lungime, în raport cu M							
A	1,022	1,036	1,094	1,049	1,119	1,070	1,043
B	1,017	1,036	1,044	1,029	1,306	1,051	1,110
C	1,042	1,066	1,067	1,075	1,101	1,148	1,122
Defect pe L9 situat la 20 % din lungime, în raport cu K							
A	1,011	1,035	1,041	1,038	1,389	1,019	1,020
B	1,024	1,013	1,031	1,017	1,437	1,040	1,073

C	1,020	1,034	1,055	1,063	1,446	1,065	1,141
Defect pe L8 situat la 80 % din lungime, în raport cu H							
A	1,025	1,064	1,051	1,061	1,084	1,100	1,037
B	1,051	1,127	1,156	1,115	1,295	1,221	1,356
C	1,050	1,196	1,227	1,089	1,331	1,135	1,177
Defect pe L11 situat la 30 % din lungime, în raport cu R							
A	1,021	1,032	1,080	1,034	1,159	1,176	1,216
B	1,109	1,184	1,090	1,122	1,370	1,302	1,222
C	1,075	1,104	1,076	1,068	1,375	1,115	1,163
Defect pe L11 situat la 80 % din lungime, în raport cu R							
A	1,032	1,038	1,051	1,078	1,090	1,114	1,087
B	1,036	1,135	1,202	1,149	1,306	1,287	1,515
C	1,049	1,070	1,134	1,089	1,202	1,243	1,390
Defect pe L12 situat la 75 % din lungime, în raport cu S							
A	1,024	1,104	1,130	1,110	1,057	1,055	1,137
B	1,055	1,212	1,227	1,291	1,261	1,224	1,263
C	1,062	1,101	1,226	1,294	1,302	1,179	1,274
Defect pe L13 situat la 55 % din lungime, în raport cu T							
A	1,034	1,100	1,107	1,067	1,114	1,113	1,105
B	1,027	1,050	1,060	1,041	1,077	1,030	1,105
C	1,034	1,059	1,063	1,060	1,170	1,080	1,035
Defect pe L14 în imediata vecinătate a stației H							
A	1,178	1,442	1,353	1,265	1,230	1,131	1,095
B	1,062	1,112	1,139	1,127	1,194	1,105	1,082
C	1,085	1,231	1,227	1,145	1,189	1,164	1,142

Analiza rezultatelor simulărilor conduce la următoarele observații:

- Valorile obținute pentru supratensiunile maxime sunt mult inferioare nivelului maxim admisibil [8].
- Valori mai mari ale factorilor de supratensiune se înregistrează la defecte în rețeaua de 400 kV.
- Supratensiunile care apar într-o zonă a rețelei de un anumit nivel de tensiune se induc și în zonele cu alte niveluri de tensiune nominală. Din acest punct de vedere prezintă importanță numai regimurile tranzitorii din rețeaua de 400 kV, care pot induce creșteri de tensiune de până la 0,4 unități relative în anumite noduri ale rețelei de 220 kV. Regimurile tranzitorii inițiate în zona de 220 kV a rețelei nu induc supratensiuni semnificative în rețeaua de 400 kV.
- Pentru un anumit regim tranzitoriu din rețeaua de 220 kV, nivelul supratensiunilor de pe barele de 220 kV ale tuturor stațiilor de transformare din schemă nu diferă cu mai mult de 0,25 u.r. Supratensiunile maxime se înregistrează, întotdeauna, pe linia cu defect.
- În majoritatea situațiilor supratensiunile maxime se înregistrează pe partea dinspre linie a întrerupătorului care are o anumită întârziere în reconectarea fazei cu defect. Există totuși unele situații în care supratensiunea maximă se înregistrează la locul producerii defectului.
- În schemele complex buclate nu se poate stabili o concluzie clară cu privire la dependența dintre nivelul supratensiunii și poziția defectului, deoarece apropierea geometrică față de o sursă, într-o astfel de rețea, nu înseamnă, întotdeauna, apropiere electrică față de aceasta.

3.2 RARM reușită

Pentru acest caz, secvența de regimuri tranzitorii este:

- producerea unui scurtcircuit monofazat pasager;
- declanșarea nesincronă a polilor de întrerupător ai fazei cu defect;
- reanclanșarea nesincronă a acestora.

Un exemplu de evoluție în timp a tensiunilor de fază este redat în fig.6, corespunzător producerii unui scurtcircuit monofazat pe faza A a liniei L1, la 80 % din lungimea liniei, în raport cu stația de transformare A.

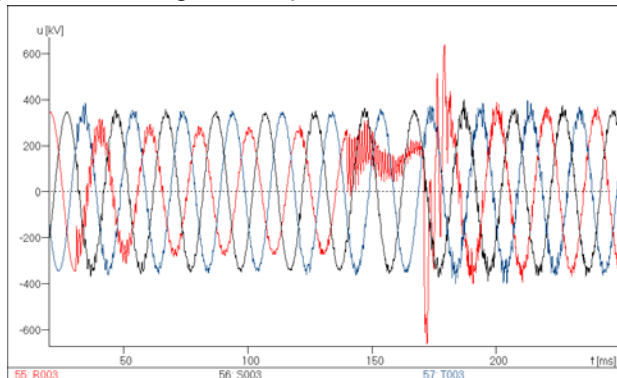


Fig. 6 - Tensiuni de fază pe linia cu defect, pentru o secvență de RARM reușită

Observațiile referitoare la nivelul supratensiunilor în regimul tranzitoriu al producerii defectului și al deconectării liniei sunt, în mod evident, identice cu acelea din cazul secvenței de RARM nereușită. Spre deosebire de această secvență, reconectarea liniei generează supratensiuni având un nivel mai înalt decât în cazul defectului permanent, însă rapid amortizate.

Unele rezultate ale simulării secvenței de RARM reușită sunt date în tabelul 2. La fel ca și în tabelul 1, rezultatele reprezintă factorii maximi de supratensiune, calculați prin raportare la valoarea de vârf a tensiunii de fază corespunzătoare tensiunii celei mai ridicate a rețelei.

Tabelul 2 – Factori de supratensiune – RARM reușită

Faza	Factor maxim de supratensiune în stația [u.r.]						
	A	C	H	F	M	R	S
Defect pe L1 situat la 25 % din lungime, în raport cu A							
A	1,354	1,434	1,287	1,189	1,367	1,203	1,327
B	1,999	1,790	1,870	1,269	1,928	1,541	2,140
C	1,602	1,340	1,194	1,157	1,176	1,238	1,292
Defect pe L1 situat la mijlocul acesteia							
A	1,371	1,364	1,255	1,148	1,274	1,229	1,291
B	1,926	1,660	1,752	1,239	1,797	1,451	1,976
C	1,572	1,390	1,217	1,111	1,155	1,244	1,327
Defect pe L1 situat în vecinătatea sistemului de bare C							
A	1,170	1,504	1,493	1,122	1,344	1,487	1,704
B	1,142	1,423	1,467	1,095	1,335	1,317	1,656
C	1,092	1,288	1,532	1,125	1,340	1,251	1,320
Defect pe L2 situat la 75 % din lungime, în raport cu B							
A	1,152	1,260	1,401	1,076	1,381	1,259	1,332
B	1,501	1,955	1,994	1,281	1,907	1,725	2,370
C	1,214	1,233	1,989	1,186	1,545	1,291	1,430
Defect pe L4 situat la mijlocul acesteia							
A	1,031	1,076	1,088	1,415	1,094	1,067	1,157
B	1,012	1,033	1,038	1,216	1,083	1,062	1,045
C	1,032	1,034	1,079	1,237	1,153	1,039	1,083
Defect pe L6 situat la 45 % din lungime, în raport cu K							
A	1,031	1,063	1,209	1,055	1,383	1,122	1,102
B	1,066	1,151	1,480	1,111	1,496	1,194	1,420
C	1,042	1,087	1,395	1,118	1,211	1,487	1,389
Defect pe L8 situat la 80 % din lungime, în raport cu K							
A	1,038	1,083	1,488	1,040	1,272	1,123	1,518

B	1,032	1,058	1,475	1,084	1,570	1,368	1,096
C	1,062	1,141	1,409	1,068	1,181	1,157	1,209
Defect pe L10 situat la 80 % din lungime, în raport cu H							
A	1,015	1,084	1,323	1,084	1,165	1,193	1,104
B	1,100	1,229	1,709	1,160	1,514	1,450	1,646
C	1,069	1,188	1,510	1,108	1,460	1,210	1,290
Defect pe L11 situat la 70 % din lungime, în raport cu R							
A	1,014	1,059	1,106	1,091	1,106	1,121	1,215
B	1,059	1,155	1,349	1,146	1,356	1,512	1,709
C	1,044	1,093	1,174	1,078	1,294	1,220	1,380
Defect pe L14 situat la 80 % din lungime, în raport cu U							
A	1,037	1,100	1,122	1,076	1,114	1,109	1,062
B	1,054	1,129	1,152	1,087	1,180	1,075	1,221
C	1,034	1,072	1,234	1,050	1,170	1,080	1,057

Concluziile asupra rezultatelor simulării secvenței de RARM nereușită rămân valabile și în cazul secvenței reanclanșării reușite, cu observația că nivelul supratensiunilor este mai mare, chiar cu până la 0,6 u.r. Această creștere a nivelului supratensiunilor nu este, însă, de suficient de mare încât să schimbe concluziile referitoare la încadrarea în limitele stipulate în normativul de coordonare a izolației.

Cele mai mari valori ale factorilor de supratensiune, atât în zona de 400 kV a rețelei analizate, cât și în aceea de 220 kV, se obțin în cazul defectelor pe liniile de 400 kV.

3.3 RART

O asemenea secvență de restaurare a structurii operative a unei rețele electrice, după producerea unui scurtcircuit monofazat implică acționarea tuturor polilor întrerupătoarelor de linie. Reanclanșarea trifazată este specifică rețelelor de medie tensiune, acționarea trifazată fiind impusă de construcția întrerupătoarelor. În instalațiile de înaltă tensiune, existența mecanismelor de acționare distincte pentru polii fiecărei faze a întrerupătoarelor permite declanșarea și reanclanșarea numai pe faza cu defect, măcar și din considerente de reducere a uzurii întrerupătoarelor de linie, în ansamblul lor. Evident, acționarea monofazată implică o atentă coordonare a protecțiilor la defecte transversale cu protecția ce nu permite funcționarea liniilor cu număr incomplet de faze.

În aceste condiții, simularea secvenței de reanclanșare automată trifazată, în rețelele de transport a energiei electrice, se justifică în sensul încercării de a identifica alte avantaje și/sau dezavantaje ale acesteia.

În condițiile acționării nesincrone a întrerupătoarelor de linie, un exemplu de evoluție în timp a tensiunilor de fază este redat în fig.7, corespunzător producerii unui scurtcircuit monofazat pe faza A a liniei L1, la 80 % din lungimea liniei, în raport cu stația de transformare A. Acționarea tuturor polilor unui întrerupător este considerată ca fiind sincronă, tipic întrerupătoarelor de ultimă generație, însă deconectarea efectivă a fiecărei faze are loc la un moment de timp foarte apropiat de momentul trecerii curentului prin zero.

Forma curbelor reprezentate în fig. 7 arată că, indiferent dacă reanclanșarea este reușită sau nereușită, nivelul supratensiunilor determinate de producerea defectului este cel mai mic, supratensiuni ceva mai mari se înregistrează la deconectarea trifazată a liniei cu defect, iar valorile maxime, semnificativ mai mari decât cele corespunzătoare producerii defectului, se obțin în cazul defectelor pe liniile de 400 kV.

punzătoare regimurilor anterioare, se înregistrează la re-conectarea automată a liniei, în condițiile în care aceeaș-ta este nesincron efectuată de către întrerupătoarele de linie.

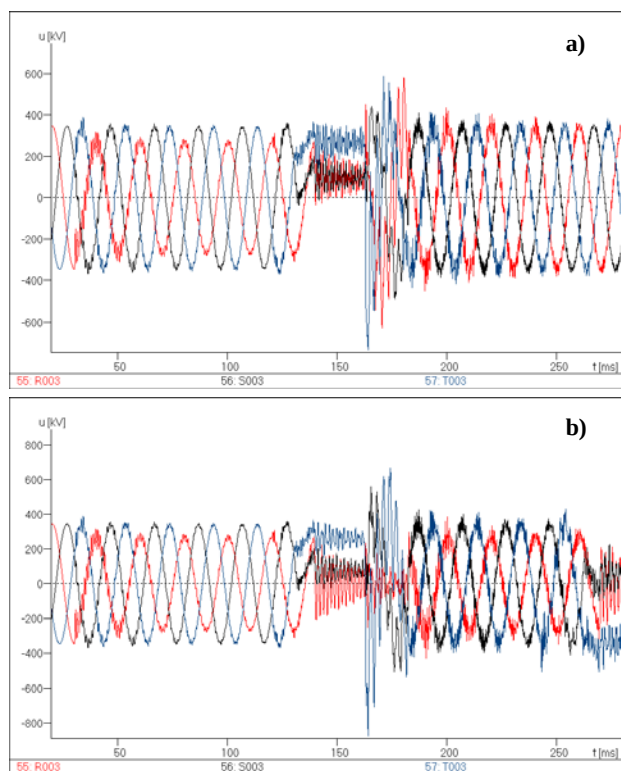


Fig. 7 - Tensiuni de fază pe linia cu defect, pentru o secvență de RART: a) - reușită; b) – nereușită.

În momentul reconectării liniei, nivelul important al supratensiunii de comutație este determinat în special de componente de 100 Hz și de 150 Hz ce se suprapun peste fundamentală. Aceste componente sunt, însă, rapid amortizate. În acest fel, nu există suspiciunea unor rezultate alterate de zgomotul numeric pe care l-ar putea da metoda de integrare, utilizată de către realizatorii pachetului de programe ATP, pentru anumite cazuri particulare.

Unele rezultate ale simulării secvenței de RART reușită și respectiv nereușită sunt date în tabelul 3, sub formă de factori de supratensiune.

Tabelul 3 – factori de supratensiune - RART

Faza	Factor maxim de supratensiune [u.r.]						
	RART reușită				RART nereușită		
	St. A	St. S	Def.	Lin.	St. S	Def.	Lin.
Defect pe L1 situat la 25 % din lungime, în raport cu A							
A	1,354	1,327	1,616	1,918	1,233	0,992	0,992
B	1,999	2,140	2,679	3,461	1,486	2,747	3,362
C	1,602	1,292	1,974	2,256	1,490	2,500	2,988
Defect pe L1 situat la jumătate din lungimea liniei							
A	1,371	1,291	1,596	1,535	1,470	1,009	1,101
B	1,926	1,976	2,741	3,102	1,296	2,979	3,233
C	1,572	1,327	2,119	2,194	1,473	2,692	2,953
Defect pe L1 situat în vecinătatea barelor C							
A	1,170	1,704	1,155	1,451	1,704	1,010	1,040
B	1,142	1,656	1,423	1,297	1,237	1,712	1,368
C	1,092	1,320	1,152	1,588	1,319	1,550	1,277
Defect pe L2 situat la 30 % din lungime, în raport cu D							
A	1,152	1,332	1,193	1,391	1,604	1,010	1,005

B	1,501	2,370	1,763	1,919	1,909	1,864	2,105
C	1,214	1,430	1,279	1,385	1,505	1,558	1,502
Defect pe L6 situat la jumătate din lungimea liniei							
A	1,031	1,102	1,142	1,151	1,007	1,005	1,005
B	1,066	1,420	1,509	1,643	1,660	1,824	1,824
C	1,042	1,389	1,420	1,563	1,516	1,597	1,597
Defect pe L9 situat la 80 % din lungime, în raport cu K							
A	1,038	1,518	1,174	1,783	1,000	1,007	1,007
B	1,032	1,096	1,684	1,268	1,671	1,713	1,713
C	1,062	1,209	1,369	1,625	1,554	1,414	1,414
Defect pe L8 situat la 80 % din lungime, în raport cu H							
A	1,015	1,104	1,308	1,914	1,037	0,989	0,996
B	1,100	1,646	1,782	2,381	1,356	1,743	2,456
C	1,069	1,290	1,405	1,827	1,177	1,495	1,666
Defect pe L11 situat la 70 % din lungime, în raport cu R							
A	1,014	1,215	1,136	1,234	1,087	0,975	0,982
B	1,059	1,709	1,743	2,102	1,515	1,548	1,824
C	1,044	1,380	1,583	1,858	1,390	1,618	1,906

St. A – Stația A (fig. 1); St. S – stația S; Def. – la locul producerii defectului; Lin. – la capătul dinspre linie al întrerupătorului mai lent.

Nivelul supratensiunilor este semnificativ mai mare decât în cazul secvenței de RARM.

Cele mai mari supratensiuni se înregistrează atunci când scurtcircuitul monofazat se produce pe una dintre liniile de 400 kV ale rețelei analizate.

În cele mai defavorabile condiții inițiale, supratensiunea maximă de pe linie poate depăși, cu până la 0,4 u.r., valoarea maximă admisibilă pentru rețelele de 400 kV. O asemenea situație nu a fost observată pentru zona de 220 kV a rețelei analizate, unde nivelul supratensiunilor este mai mic cu cel puțin o unitate relativă față de valoarea maximă admisibilă.

Ca și în cazul reanclanșării monofazate, reanclanșarea întrerupătoarelor liniilor de 400 kV generează supratensiuni, de până la 2,2 u.r., și în zona de 220 kV a rețelei. Nivelul acestor supratensiuni poate fi apropiat de acela rezultat în urma reanclanșării întrerupătoarelor liniilor de 220 kV.

Producerea unor defecte pe liniile de 220 kV, urmată de secvență de RART, nu are o influență importantă asupra tensiunilor din zona de 400 kV a rețelei.

Observațiile anterioare conduc la concluzia utilizării exclusive a reanclanșării automate rapide monofazate în rețelele de transport a energiei electrice.

3.4 Deconectarea liniilor la defecte polifazate

În condițiile în care pe una dintre liniile rețelelor de transport a energiei electrice se produce un scurtcircuit polifazat, sistemele de protecție deconectează linia respectivă, fără încercări automate de refacere a structurii operative a rețelei. În consecință, secvența de regimuri tranzitorii are numai două componente:

- producerea defectului polifazat, eventual prin transformarea unui scurtcircuit monofazat;
- deconectarea definitivă a întrerupătoarelor de la extremitățile liniei cu defect.

Evoluția în timp a tensiunilor de fază, pentru o astfel de secvență, este reprezentată în fig. 8. Aceasta corespunde producerii unui scurtcircuit bifazat cu pământ pe linia L1, la o distanță de 80 % din lungimea liniei, în raport cu

stația de transformare A.

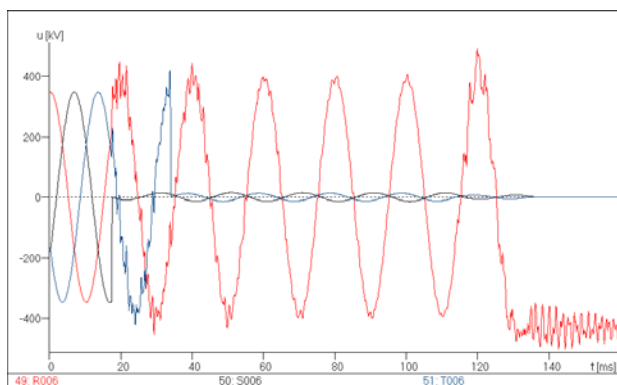


Fig. 8 – Tensiuni de fază pe linia cu scurtcircuit bifazat la pământ

Producerea defectului monofazat și transformarea acestuia în scurtcircuit bifazat nu este însoțită de supratensiuni semnificative, nivelul acestora nedeșășind 1,3 u.r. – pe liniile de 400 kV și 1,2 u.r. – pe liniile de 200 kV ale rețelei analizate. La deconectarea liniei cu defect nivelul supratensiunilor poate atinge 1,4 u.r., cele mai mari valori ale factorilor de supratensiune înregistrându-se pe partea dinspre linie a întrerupătoarelor mai îndepărtate de sursă.

Ca și în cazul secvenței de RAR, producerea defectului pe liniile de 400 kV ale rețelei și secvența de deconectare a liniei afectate sunt resimțite în rețeaua de 200 kV. În acest sens, este edificatoare reprezentarea grafică din fig. 9, care dă evoluția în timp a tensiunilor pe barele stației de transformare S, pentru același defect pentru care sunt date curbele din fig. 8.

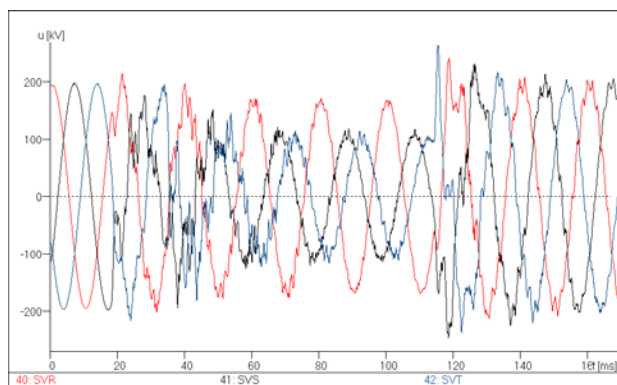


Fig. 9 – Tensiuni de fază pe barele stației S (220 kV), la producerea unui scurtcircuit pe linia L1(400 kV)

În cazul defectelor polifazate fără contact la pământ nivelul supratensiunilor este cu totul neglijabil, singura solicitare fiind dată de supracurenții foarte intensi.

În concluzie, producerea defectelor polifazate și deco-

nectarea liniilor cu defect generează supratensiuni de comutație mai mici decât producerea scurtcircuitelor monofazate, urmată de secvență de RARM.

4. CONCLUZII

Secvențele de regimuri tranzitorii electromagnetice, inițiate de producerea unor scurtcircuite pe liniile rețelei de transport a energiei electrice analizate, nu determină producerea unor supratensiuni de comutație periculoase, indiferent dacă automatica de sistem demarează o secvență de reanclanșare automată rapidă monofazată sau deconectează definitiv linia cu defect.

Cele mai mari valori ale factorilor de supratensiune se înregistrează la reconectarea liniilor de 400 kV, secvențele de regimuri tranzitorii generate de producerea scurtcircuitelor monofazate pe aceste linii putând induce creșteri de tensiune, de până la 0,4 unități relative, în anumite noduri ale rețelei de 220 kV.

Valorile cele mai mari ale factorilor de supratensiune se obțin atunci când întrerupătoarele de linie nu acționează perfect sincron. Supratensiunile maxime se înregistrează, în majoritatea situațiilor, pe partea dinspre linie a întrerupătorului care are o anumită întârziere în reconectarea fazei cu defect.

Datorită nivelului inadmisibil de mare al supratensiunilor, reanclanșarea automată rapidă trifazată nu poate fi utilizată în rețelele de transport a energiei electrice, chiar dacă lungimea liniilor, aflate în structura rețelei, nu este foarte mare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] G. Drăgan N. Golovanov, C. Mazzeti, A. Moraru, B. Nicoară, C.A. Nucci, M. Costea, L.D. Drăgan, *Tehnica tensiunilor înalte – Vol. II*, Editura Academiei Române, București, 2001.
- [2] M. Gușă, M. Istrate, N. Gavrilăș, C. Asaftei, *Tehnica tensiunilor înalte - Supratensiuni în sistemele electroenergetice*, Editura Fundației Culturale “Renașterea Română”, Iași, 1997.
- [3] B.A. Carreras, V.E. Lynch, D.E. Newman, *Blackout mitigation assessment in power transmission systems*, Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003.
- [4] M. Istrate, *Contribuții la coordonarea izolației rețelelor electrice, în vederea compactizării liniilor electrice aeriene*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică „Gh.Asachi” Iași, 1996
- [5] M. Istrate, M. Gușă, N. Gavrilăș, C. Ciobanu, *EMTP Study on Complex Unsymmetrical Faults in Distribution Networks*, Proc. of The 22-st Seminar on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory, Gliwice, Poland, 1999, pp. 383÷386.
- [6] M. Gușă, *Regimuri tranzitorii în rețelele electrice – Analiză asistată de calculator*, Editura „Gh.Asachi”, Iași, 2002.
- [7] ***, *Alternative Transients Program - Rule Book*, Canadian/American EMTP User Group, 1992.
- [8] ***, *Normativ privind alegerea izolației, coordonarea izolației și protecția instalațiilor electroenergetice împotriva supratensiunilor - NTE 001/03/00*, ISPE București, ANRE, 7.02.2003