

Aplicație numerică

1. Problemă rezolvată

Să se determine nivelul maxim al supratensiunii care solicită izolația transformatorului din schema de propagare dată în fig.9, în condițiile în care toate capacitățile echipamentelor din stația de 110/20 kV sunt deplasate în nodul **B**, cu transformator.

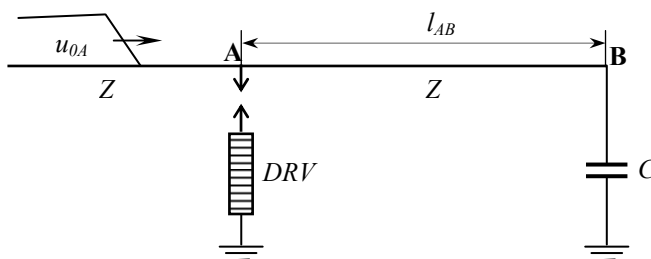


Fig. 9. Schema de propagare obținută prin concentrarea capacităților într-un singur nod

Datele de intrare ale calculului sunt:

✓ Unda de tensiune

- amplitudinea unei de tensiune este egală nivelului de ținere la impuls de trăsnet a izolației liniei, pe partea solicitată la impuls de trăsnet (110 kV) - $U_{0A, \max} = 700$ kV;
- legea de variație în timp a unei de impuls de tensiune este

$$u_{0A}(t) = \begin{cases} a \cdot t, & \text{dacă } t \leq t_f \\ U_{0A, \max} - b \cdot (t - t_f), & \text{dacă } t > t_f \end{cases}; \quad (10)$$

- panta tensiunii pe frontul unei de impuls este $a = 350$ kV/ μ s;
- panta tensiunii pe spatele unei de impuls este $b = 6,73$ kV/ μ s;
- durata frontului unei $t_f = 2$ μ s;
- durata de semiamplitudine $t_s = 50$ μ s.

✓ Caracteristicile echipamentelor pasive

- impedanța caracteristică a liniei și a barelor colectoare $Z = 400$ Ω ;
- capacitatea echivalentă de impuls a echipamentelor $C = 5000$ pF;
- tensiunea de ținere la impuls a izolației transformatorului $U_{t, \text{trafo}} = 450$ kV;
- tensiunea de ținere la impuls a izolației celorlalte echipamente $U_{t, \text{ech}} = 550$ kV;
- distanța reală dintre descărcător și transformator $l_{AB} = 75$ m.

✓ Caracteristicile descărcătorului

- tip XAF – 108, fabricație ASEA;
- tensiunea maximă admisibilă pe descărcător - 108 kV_{ef};
- tensiunea minimă de amorsare la frecvență industrială - 170 kV_{ef};
- tensiunea de 100 % amorsare la impuls de tensiune de trăsnet - 260 kV_{max};
- tensiunea de amorsare pe frontul unei de impuls - 295 kV_{max};
- tensiunea de amorsare la impuls de tensiune de comutație - 305 kV_{max};

- curentul nominal de descărcare - $10 \text{ kA}_{\text{max}}$;
 - tensiunea reziduală la curent nominal de descărcare - $270 \text{ kV}_{\text{max}}$;
 - curentul admisibil la undă rectangulară de $2000 \mu\text{s}$ - 600 A ;
 - clasa limitatorului de suprapresiune - $40 \text{ kA}_{\text{ef}}$;
 - caracteristica tensiune-curent a rezistorului nelinier se trasează prin punctele

$$U_{\text{rezidual}} = 230 \text{ kV, la } I_D = 1 \text{ kA,}$$

$$U_{\text{rezidual}} = 263 \text{ kV, la } I_D = 5 \text{ kA,}$$

$$U_{\text{rezidual}} = 270 \text{ kV, la } I_D = 10 \text{ kA;}$$
- caracteristici care prezintă importanță pentru actuala analiză.

După determinarea valorii maxime a tensiunii care solicită izolația transformatorului de putere, să se calculeze marja de siguranță în realizarea protecției acestuia.

Rezolvare

Se calculează:

- constanta de timp a circuitului, $T = Z \cdot C = 400 \cdot 5000 \cdot 10^{-12} = 2 \mu\text{s}$;
- durata de propagare, dus-întors, a undei pe tronsonul de bare, $\tau = 2 \cdot l_{AB} / v = 0,5 \mu\text{s}$.

Funcție de durata de propagare se adoptă pasul de calcul; în acest exemplu, pasul de calcul se va alege egal cu durata de propagare dus-întors a undei, $\Delta t = \tau = 0,5 \mu\text{s}$.

Se adoptă, ca valoare a tensiunii inițiale pe izolația transformatorului, valoarea de vârf a tensiunii alternative de aceeași polaritate cu aceea a impulsului, $U_{C0} = 103 \text{ kV}$.

Rezultatele calculului, pentru fiecare pas al acestuia, se trec într-un tabel de forma tabelului 2, în care notațiile au fost făcute intuitiv, astfel: U_{0A} - impulsul de tensiune format pe linie, undă incidentă pentru nodul **A**; U_A - tensiunea din nodul cu descărcător, calculată atât în condițiile în care acesta ar lipsi (valoare necesară în construcția grafică realizată pe baza metodei caracteristicilor), cât și în prezența descărcătorului (rezultat al aplicării metodei caracteristicilor); U_{AB} – unda care se propagă din nodul **A** spre nodul **B** (incidentă pentru nodul **B**); U_B – tensiunea din punctul nodal **B**, care determină solicitarea izolației echipamentului și care se determină prin metoda subtangentei; U_{BA} – unda care se propagă din nodul **B** spre nodul **A** (undă reflectată din **B**).

Algoritmul de calcul este următorul:

- ✓ momentul inițial al regimului tranzitoriu, $t = 0$
- în acest moment unda incidentă U_{0A} ajunge în nodul **A**, iar toate valorile tensiunilor sunt nule, mai puțin tensiunea din punctul nodal **B**, unde, conform ipotezelor de calcul, aceasta este egală cu valoarea de vârf a tensiunii alternative, $U_{C0} = 103 \text{ kV}$;
- valorile tensiunilor din nodurile **A** și **B**, la acest moment, se utilizează pentru determinarea valorii tensiunii din nodul **B**, în pasul următor de calcul; construcția grafică corespunzătoare este dată în fig.10;
- ✓ următorii pași de calcul
- valoarea tensiunii U_{0A} (coloana 2) rezultă prin particularizarea relației (10), pentru momentul corespunzător pasului de calcul curent;

- amplitudinea undei reflectate, U_{BA} (coloana 3), se preia din coloana 9 corespunzătoare pasului anterior de calcul, deoarece s-a ales pasul de calcul egal cu durata de propagare dus-întors a undei pe tronsonul de lungime l_{AB} ; dacă pasul de calcul ar fi fost ales ca fiind egal cu durata de propagare într-un singur sens, atunci ar trebui luată valoarea din aceeași coloană, însă cu doi pași de calcul în urmă;
 - tensiunea din nodul cu descărcător (coloanele 4 și 5) rezultă ca sumă algebrică dintre valoarea tensiunii undei incidente și a celei reflectate, în pasul de calcul curent (coloana 4); amorsarea descărcătorului face ca nivelul tensiunii să fie impus de acesta, valoarea corespunzătoare pasului de calcul curent fiind determinată prin intermediul metodei caracteristicilor, conform reprezentării grafice din fig.11;
 - valoarea tensiunii din nodul **A** rezultă prin suprapunerea undei directe cu unda reflectată, ori fiind cunoscută valoarea tensiunii din nod (coloana 5) și aceea a undei reflectate (U_{BA} - coloana 3) rezultă amplitudinea undei ce se propagă către nodul **B**, U_{AB} - coloana 6;
 - dublul valorii tensiunii calculate anterior (coloana 7) este utilizat pentru construcția grafică corespunzătoare metodei subtangente, prin intermediul căreia se obține tensiunea din nodul **B**, însă pentru următorul pas de calcul;
 - tensiunea din nodul **B**, coloana 8, a rezultat prin aplicarea metodei subtangentei, în pasul anterior de calcul;
 - fiind cunoscută tensiunea din nodul **B** și valoarea tensiunii undei incidente (U_{AB}), rezultă valoarea tensiunii pe unda reflectată, U_{BA} - coloana 9, valoarea ce va fi utilizată în unul dintre pașii de calcul următori, funcție de raportul în care află durata de propagare dus-întors a undei pe linie și intervalul de timp asociat pasului de calcul (în acest exemplu, valoarea astfel obținută este utilizată chiar în pasul următor).
- ✓ *Observație* - momentul amorsării descărcătorului

Este puțin probabil ca momentul amorsării să coincidă cu momentul corespunzător unui anumit pas de calcul. Așa cum se poate observa și din tabelul 2, în calculele efectuate pentru momentul $t = 1,5 \mu\text{s}$ s-a obținut o valoare a tensiunii pe descărcător de 319 kV, mai mare decât tensiunea de amorsare a acestuia. În aceste condiții, pe baza ipotezei linearizării undelor, pe intervale, se poate găsi momentul în care tensiunea din nodul **A** este egală cu tensiunea de amorsare a descărcătorului. Astfel, pentru exemplul de calcul ales, panta pe frontul undei de supratensiune formate pe liniei (U_{0A}) este de 350 kV/ μs . Panta undei reflectate, în intervalul 1,0 – 1,5 μs este dată de relația

$$a_{refl} = \frac{U_{BA}(t=1,5) - U_{BA}(t=1,0)}{1,5 - 1} = \frac{-206 - (-100)}{0,5} = -212 \text{ kV}/\mu\text{s}. \quad (11)$$

Pentru determinarea momentului amorsării, cuprins, evident, în intervalul 1,0 – 1,5 μs , se poate utiliza o ecuație de forma

$$U_{0A}(t_1) + a \cdot \Delta t_a + U_{BA}(t_1) + a_{refl} \cdot \Delta t_a = U_{amors}, \quad (12)$$

în care t_l [μs] reprezintă momentul corespunzător începutului intervalului în care se produce amorsarea, a [$\text{kV}/\mu\text{s}$] este panta tensiunii pe frontul undei formate pe linie, U_{amors} [kV] este tensiunea de amorsare a descărcătorului, iar Δt_a [μs] intervalul de timp dintre momentul t_l și momentul amorsării.

Pentru exemplul de calcul ales, se obține

$$\Delta t_a = \frac{U_{amors} - U_{0A}(t_l) - U_{BA}(t_l)}{a + a_{refl}} = \frac{260 - 350 + 100}{350 - 212} \cong 0,07 \mu\text{s}. \quad (13)$$

Se aproximează $\Delta t_a = 0,1 \mu\text{s}$, pentru facilitarea realizării construcțiilor grafice. Rezultă că amorsarea descărcătorului se produce la $1,1 \mu\text{s}$, acest moment devenind de referință în calculele ulterioare (la acesta se adaugă pasul de calcul Δt).

Tabelul 2. Tabel de calcul a tensiunilor din punctele nodale

t [μs]	U_{0A} [kV]	$U_{BA} = U_B - U_{AB}$ [kV]	$U_A = U_{0A} + U_{BA}$		$U_{AB} = U_A - U_{BA}$ [kV]	$2 \cdot U_{AB}$ [kV]	U_B [kV]	$U_{BA} = U_B - U_{AB}$ [kV]
			în absența DRV	impus de DRV				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	175	0	175	175	$175 - 0 = 175$	350	75	$75 - 175 = -100$
1,0	350	-100	250	250	$250 - (-100) = 350$	700	144	$144 - 350 = -206$
1,5	526	-206	319	Descărcătorul a amorsat în intervalul 1 – 1,5 μs				
1,1	385	-125	260	141,5	$141,5 - (-125) = 266,5$	533	171,5	$171,5 - 266,5 = -95$
1,6	560	-95	465	227,5	$227,5 - (-95) = 322,5$	645	262	$262 - 322,5 = -60,5$
2,1	699	-60,5	638,5	255,5	$255,5 - (-60,5) = 316$	632	357,5	$357,5 - 316 = 41,5$
2,6	696	41,5	737,5	257,5	$257,5 - 41,5 = 216$	432	426	$426 - 216 = 210$
3,1	692	210	902	259	$259 - 210 = 49$	98	427,5	$427,5 - 49 = 378,5$
3,6	688,5	378,5	1067	260,5	$260,5 - 378,5 = -118$	-236	345	$345 - (-118) = 463$
4,1	685	463	1148	261	$261 - 463 = -202$	-404	200	$200 - (-202) = 402$
4,6	682	402	1084	261	$261 - 402 = -141$	-282	50	$50 - (-141) = 191$
5,1	678,5	191	869,5	261	$261 - 191 = 70$	140	-35	$-35 - 70 = -105$
5,6	675	-105	570	249	$249 - (-105) = 354$	708	10,5	$10,5 - 354 = -343,5$
6,1	672	-343,5	328,5	174,5	$174,5 - (-343,5) = 518$	1036	184	$184 - 518 = -334$

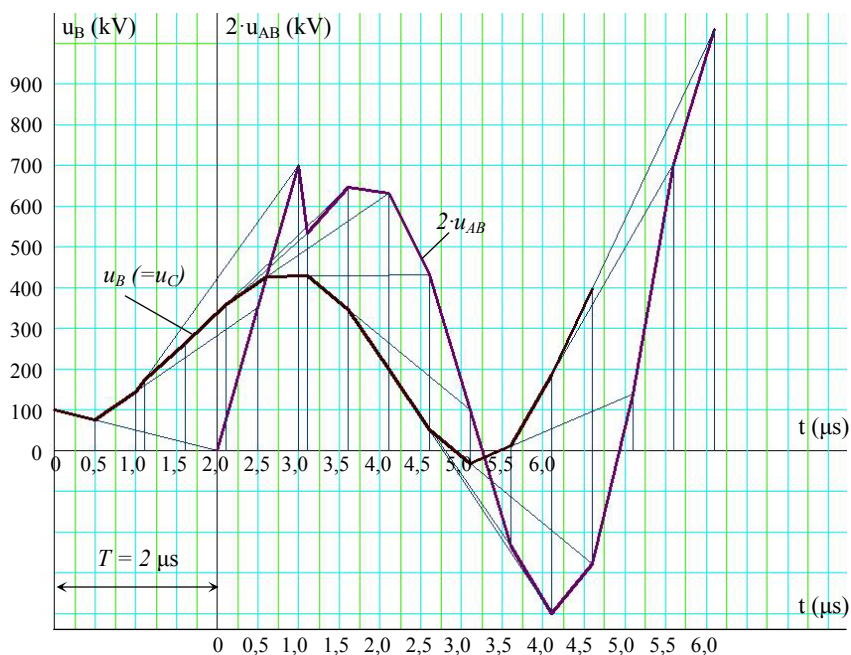


Fig. 10. Aplicarea metodei subtangentei pentru exemplul de problemă

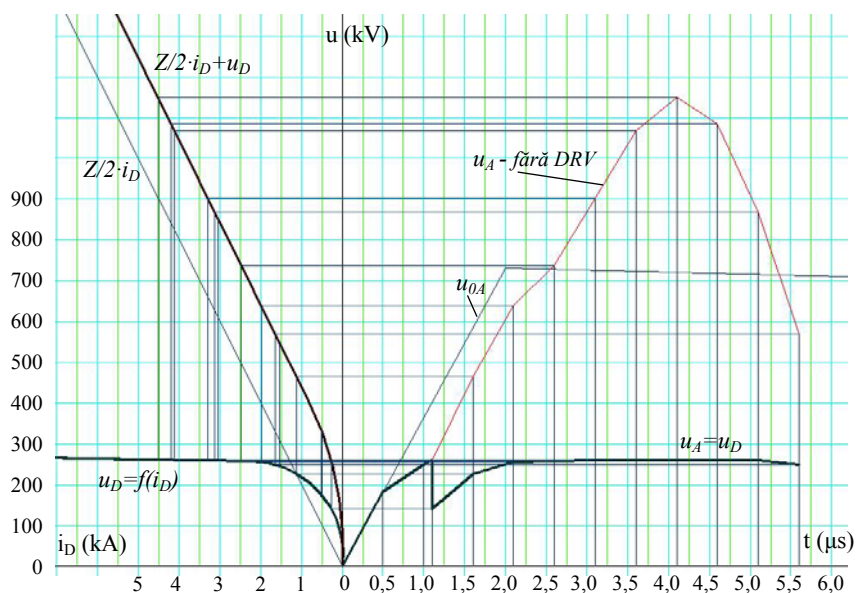


Fig. 11. Aplicarea metodei caracteristicilor (Bergeron) pentru exemplul de problemă

Așa cum rezultă din tabelul 2 și din fig.10, nivelul maxim al supratensiunii din nodul **B**, în care se află, în schema reală, transformatorul de putere, este de 427,5 kV. Această tensiune este mai mică cu 5 % decât tensiunea nominală de ținere la impuls de trăsnet a izolației transformatorului. Marja de siguranță este mai mică de 20 %, existând riscul

producerii unui defect de izolație în transformator. În consecință, pentru rea-lizarea unei protecții sigure, trebuie micșorată distanța dintre descărcător și transformator, însă de așa manieră încât celelalte echipamente să rămână în zona de protecție a descărcătorului, cu marjă de siguranță suficient de mare.

2. Probleme propuse

Problema 1

Să se rezolve problema ale cărei date de intrare sunt prezentate la § 2.1, însă pentru o distanță între descărcător și transformator de 45 m.

Problema 2

Să se rezolve problema ale cărei date de intrare sunt prezentate la § 2.1, însă pentru o distanță între descărcător și transformator de 45 m și un pas de calcul egal cu jumătate din durata de propagare dus-întors a undei pe linie (τ). Să se compare rezultatele cu acelea obținute prin rezolvarea problemei 1.

Problema 3

Să se determine nivelul maxim al supratensiunii care solicită izolația autotransformatorului unei stații de transformare 220/110/20 kV, a cărei schemă de propagare redusă este de tipul celei date în fig.9. Toate capacitățile echipamentelor sunt deplasate în nodul cu autotransformator, iar solicitarea este dată de o undă de supratensiune de trăsnet formată pe o linie de 220 kV.

Datele de intrare:

✓ *Unda de tensiune*

- amplitudinea undei de tensiune este egală cu tensiunea de conturare la impuls a izolației liniei de 220 kV - $U_{0A, \max} = 1000$ kV;
- legea de variație în timp a undei de impuls de tensiune este

$$u_{0A}(t) = \begin{cases} a \cdot t, & \text{pentru } t \leq t_f \\ U_{0A, \max} - b \cdot (t - t_f), & \text{pentru } t > t_f \end{cases}; \quad (10)$$

- panta tensiunii pe frontul undei de impuls este $a = 500$ kV/ μ s;
- panta tensiunii pe spatele undei de impuls este $b = 13,15$ kV/ μ s;
- durata frontului undei $t_f = 2$ μ s;
- durata de semiamplitudine $t_s = 50$ μ s.

✓ *Caracteristicile echipamentelor pasive*

- impedanța caracteristică a liniei și a barelor colectoare $Z = 400$ Ω ;
- capacitatea echivalentă de impuls a echipamentelor $C = 4500$ pF;
- tensiunea nominală de ținere la impuls a transformatorului $U_{t, \text{trafo}} = 950$ kV;
- tensiunea nominală de ținere la impuls a celorlalte echipamente $U_{t, \text{ech}} = 1050$ kV;

- distanța reală dintre descărcător și transformator $l_{AB} = 90$ m.

✓ *Caracteristicile descărcătorului*

- tip XAE – 210A, fabricație ASEA;
- tensiunea de 100 % amorsare la impuls de tensiune de trăsnet - $500 \text{ kV}_{\text{max}}$;
- curentul nominal de descărcare - $10 \text{ kA}_{\text{max}}$;
- tensiunea reziduală la curent nominal de descărcare - $500 \text{ kV}_{\text{max}}$;
- caracteristica tensiune-curent a rezistorului nelinier se trasează prin punctele

$$U_{\text{rezidual}} = 258 \text{ kV, la } I_D = 1 \text{ kA,}$$

$$U_{\text{rezidual}} = 456 \text{ kV, la } I_D = 5 \text{ kA,}$$

$$U_{\text{rezidual}} = 500 \text{ kV, la } I_D = 10 \text{ kA.}$$