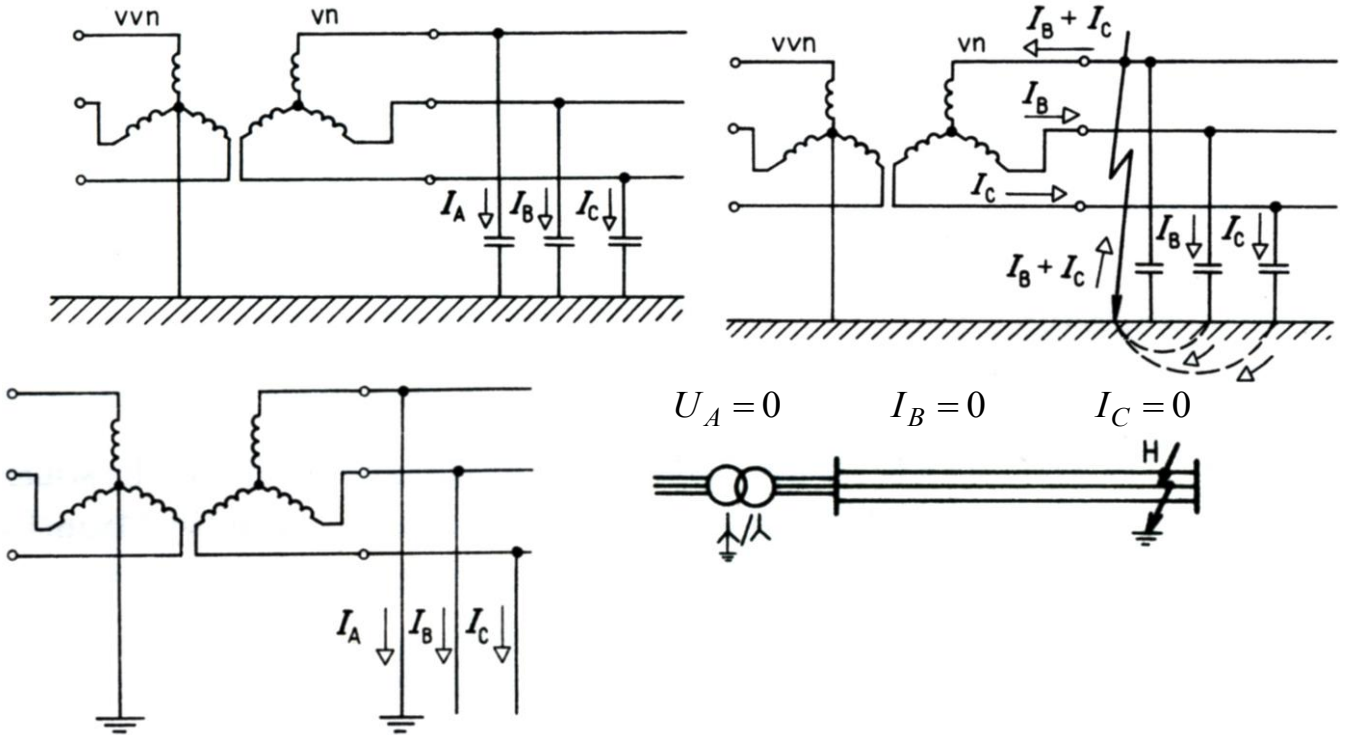


# PJS – Přednáška číslo 6

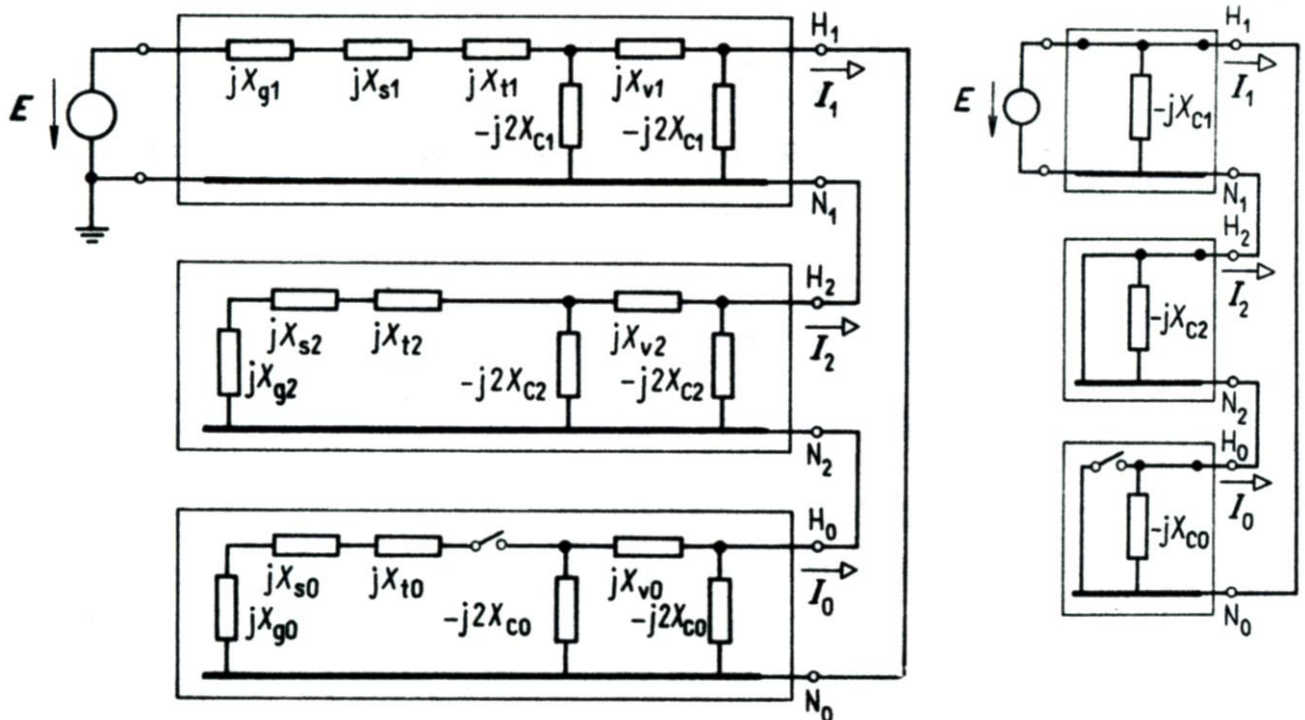
## Řešení nesymetrických stavů v ES metodou souměrných složkových soustav

### Zemní spojení

Trvalé zemní spojení v síti s izolovaným nulovým bodem



Protože  $X_G^{(i)}, X_S^{(i)}, X_T^{(i)}, X_V^{(i)} \ll X_C^{(i)}$ , pak přibližně:



$$I^{(1)} = \frac{E}{Z_C^{(1)} + Z_C^{(2)} + Z_C^{(0)}} = \frac{E}{-jX_C}$$

$$I^{(2)} = I^{(1)}$$

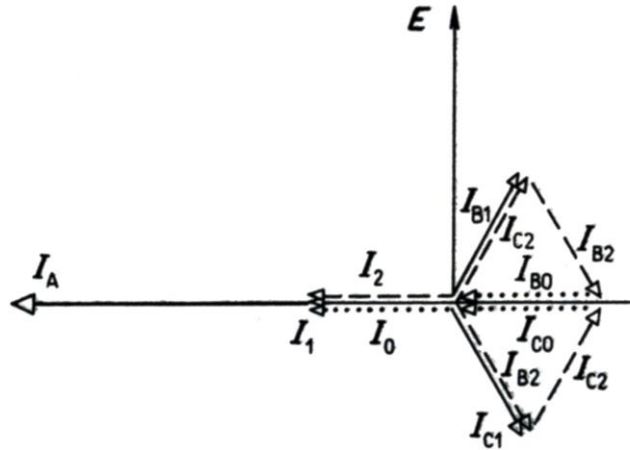
$$I^{(0)} = I^{(1)}$$

$$U^{(1)} = E$$

$$U^{(2)} = 0$$

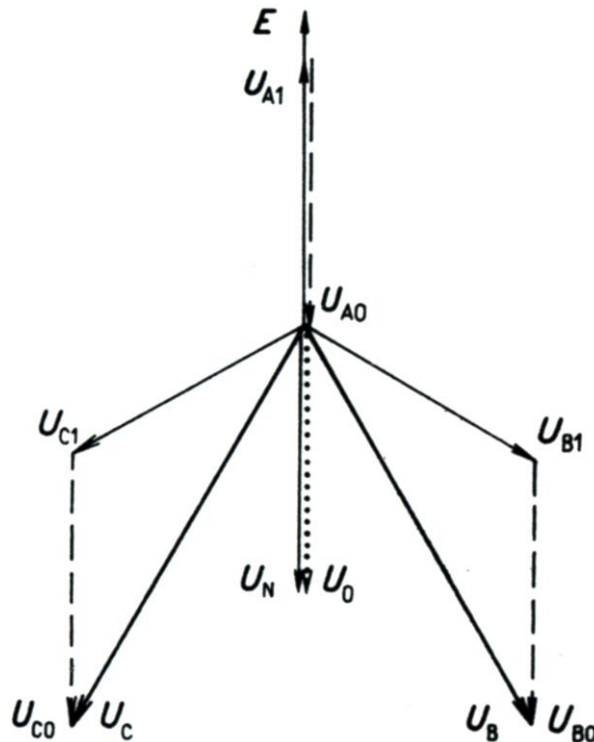
$$U^{(0)} = -E$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^{(1)} \\ I^{(2)} \\ I^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^{(1)} \\ I^{(1)} \\ I^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3I^{(1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

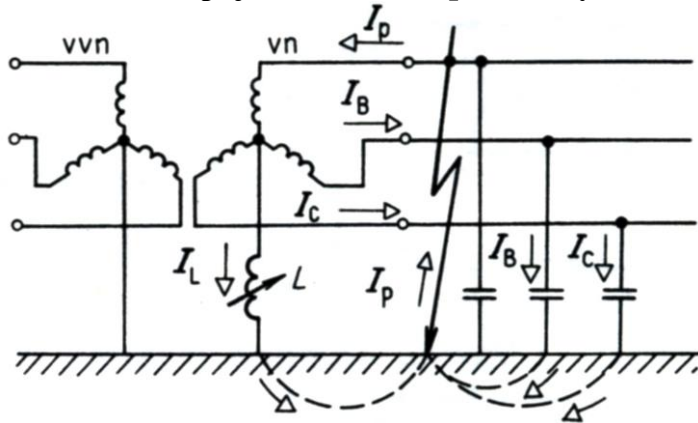


$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ U^{(2)} \\ U^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ -E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (a^2 - 1)E \\ (a - 1)E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_B - E \\ E_C - E \end{bmatrix}$$

$$U_N = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C) = \frac{1}{3}(0 + (a^2 - 1)E + (a - 1)E) = -E$$



**Trvalé zemní spojení v síti s kompenzovaným nulovým bodem**

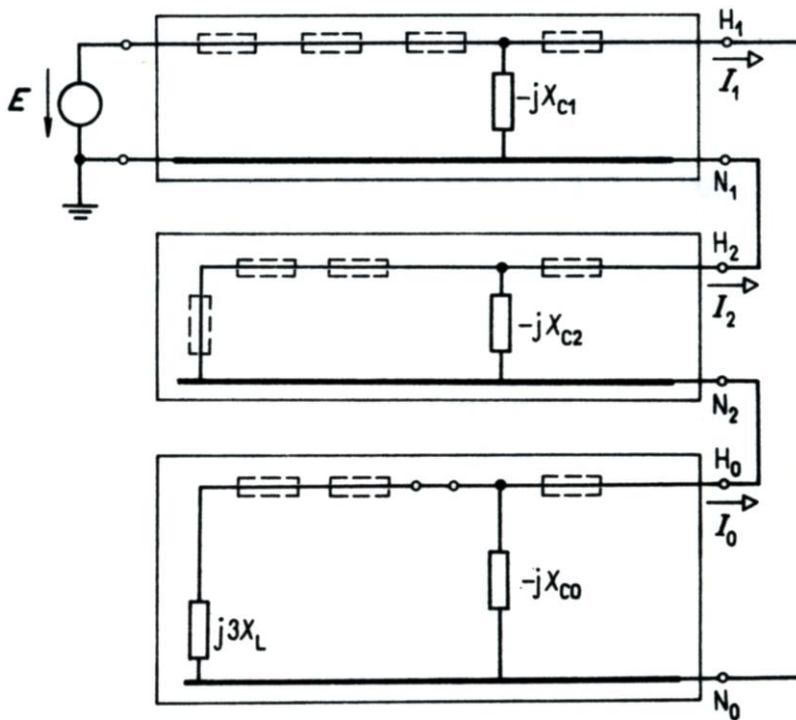


$$Z_C^{(1)} \rightarrow 0$$

$$Z_C^{(2)} \rightarrow 0$$

$$Z_C^{(0)} = \frac{j3X_L(-jX_C)}{j3X_L - jX_C}$$

$$Z_C^{(0)} = \frac{j3X_LX_C}{X_C - 3X_L}$$



$$I^{(1)} = \frac{E}{Z_C^{(1)} + Z_C^{(2)} + Z_C^{(0)}}$$

$$I^{(1)} = \frac{E}{\frac{j3X_LX_C}{X_C - 3X_L}}$$

$$I_A = 3I^{(1)} = -j \frac{(X_C - 3X_L)E}{X_LX_C}$$

Podmínka vyladění:  
 $(X_C - 3X_L) \rightarrow 0$

$$I_L = 3I_L^{(0)} = 3 \frac{U^{(0)}}{j3X_L} = j \frac{E}{X_L}$$

$$I_C^{(1)} = \frac{U^{(1)}}{-jX_C} = j \frac{E}{X_C}$$

$$I_C^{(2)} = 0$$

$$I_C^{(0)} = \frac{U^{(0)}}{-jX_C} = j \frac{-E}{X_C} = -I_C^{(1)}$$

Poruchové proudy:

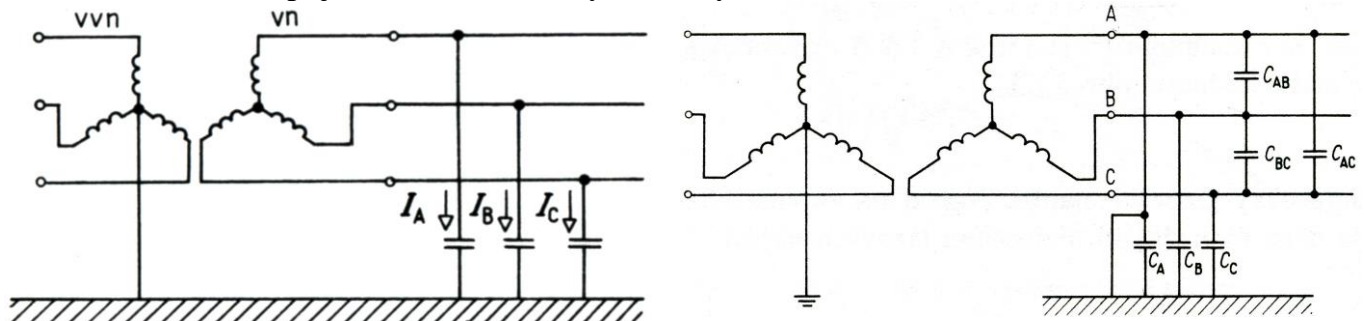
$$\begin{bmatrix} I_{CA} \\ I_{CB} \\ I_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^{(1)} \\ I^{(2)} \\ I^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j \frac{E}{X_C} \\ 0 \\ -j \frac{E}{X_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (a^2 - 1)j \frac{E}{X_C} \\ (a - 1)j \frac{E}{X_C} \end{bmatrix}$$

Součet proudů v neporušených fázích:  $I_{CB} + I_{CC} = [(a^2 - 1) + (a - 1)]j \frac{E}{X_C} = -3j \frac{E}{X_C}$

Celkový poruchový proud je stejný jako proud  $I_A$ :

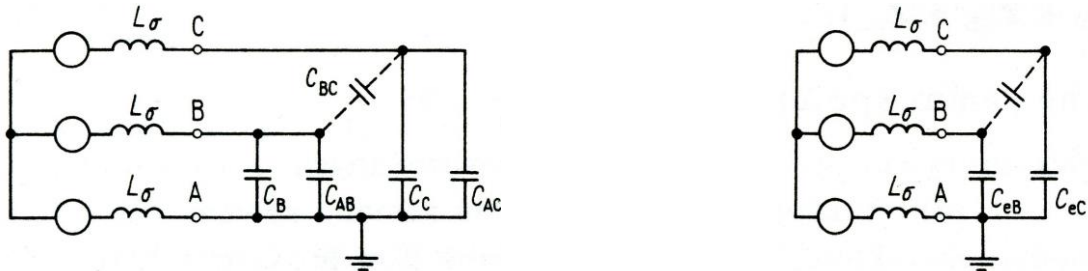
$$I_P = I_{CB} + I_{CC} + I_L = -3j \frac{E}{X_C} + j \frac{E}{X_L} = j \frac{X_C - 3X_L}{X_C X_L} E$$

### Přerušované zemní spojení v síti s izolovaným nulovým bodem



Po vzniku zemního spojení ve fázi „A“ jsou kapacity  $C_B$  a  $C_{AB}$  spojeny paralelně, podobně kapacity spojené s fází „C“, tedy  $C_C$  a  $C_{AC}$ . Výsledná ekvivalentní kapacita je tedy:

$$C_{ekv} = C_{eB} = C_B + C_{AB} = C_{eC} = C_C + C_{AC}.$$



Pokud došlo k zemnímu spojení v okamžiku maximální okamžité hodnoty fáze „A“, potom:

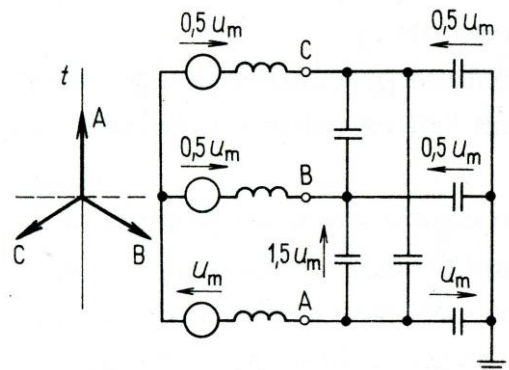
$$u_A(0) = u_m$$

$$u_B(0) = -\frac{u_m}{2}$$

$$u_C(0) = -\frac{u_m}{2}$$

Napětí na mezifázových kapacitách:

$$u_{BA}(0) = u_{CA}(0) = -\frac{u_m}{2} - u_m = -1.5u_m$$



Po paralelním spojení kapacit je výsledné napětí dáno celkovým nábojem původních kapacit vztaženým na kapacitu ekvivalentní:

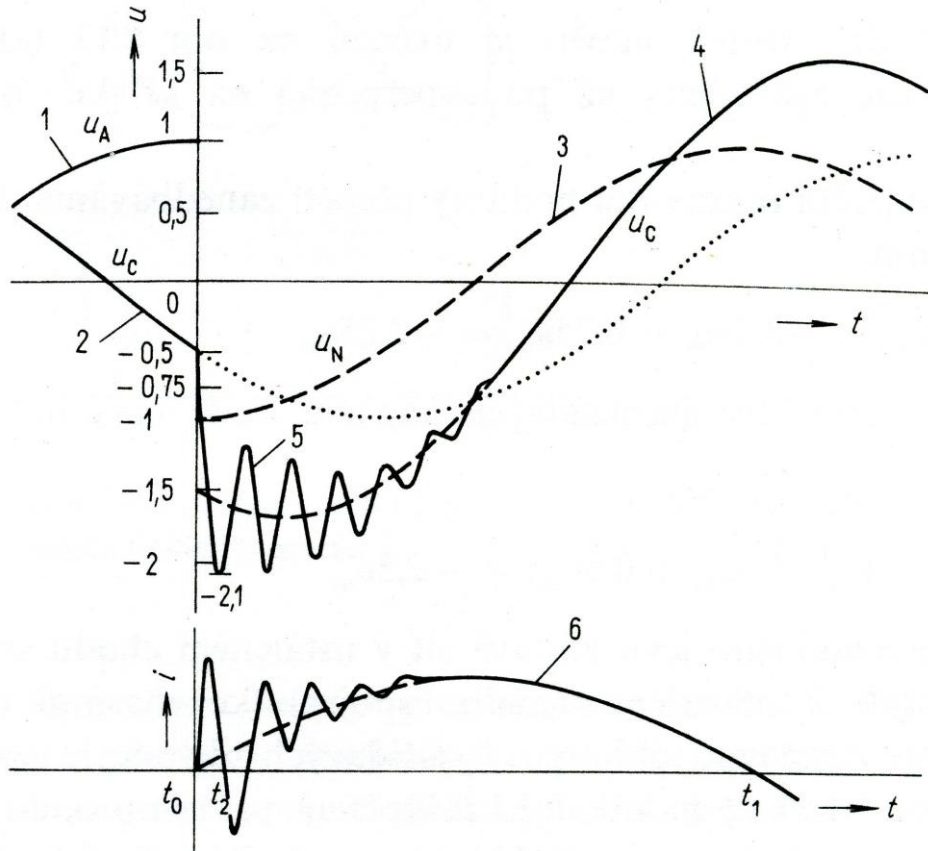
$$u_{ekvB}(0) = \frac{Q_{ekv}}{C_{ekv}} = \frac{Q_B(0) + Q_{AB}(0)}{C_B + C_{AB}} = \frac{-0.5u_m C_B - 1.5u_m C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = -\frac{C_B + 3C_{AB}}{2(C_B + C_{AB})} u_m$$

$$u_{ekvC}(0) = \frac{Q_{ekv}}{C_{ekv}} = \frac{Q_C(0) + Q_{AC}(0)}{C_C + C_{AC}} = \frac{-0.5u_m C_C - 1.5u_m C_{AC}}{C_C + C_{AC}} = -\frac{C_C + 3C_{AC}}{2(C_C + C_{AC})} u_m$$

Poměr  $C_B/C_{AB}$  resp.  $C_C/C_{AC}$  bývá mezi 3 a 4. Pokud zvolíme obvyklou hodnotu 3, potom

$$u_{ekvB}(0) = u_{ekvC}(0) = -0.75u_m.$$

Napětí, které je ale na  $C_{ekv}$  přikládáno  $u_{CA}(0)=-1.5$  je v okamžiku vzniku zemního spojení větší, dojde tedy k přechodnému přebíjecímu ději s odpovídající odchylkou:



Průběh určen jako překmit mezi součtovou křivkou výsledného ustáleného napětí  $u_u$  (křivka „4 = 3 + 2“) (na obrázku pro fázi „C“):

- Aktuální napětí uzlu zdroje (křivka 3)
- Napětí původního fázového průběhu – určeno fázovým napětím zdroje (křivka 2)

Je patrný přechod ustálené složky  $u_u$  na sdruženou velikost napětí.

Přechodná složka dozívá rychle a za první půlperodu klesne na cca 80%.

Velikost počáteční amplitudy přechodné „volné“ složky je dána rozdílem původní a nové hodnoty napětí, tedy:

$$u_V(0) = u_u(0) - u_{ekv}(0) = -1.5u_m - (-0.75u_m) = -0.75u_m$$

Maximální hodnota okamžité hodnoty napětí je tedy:

$$u_{MAX} = u_u(0) + 0.8 \cdot u_V(0) = -1.5u_m + 0.8 \cdot (-0.75u_m) \approx -2.1u_m$$

Pokud bychom zanedbali tlumení přechodné složky, potom:

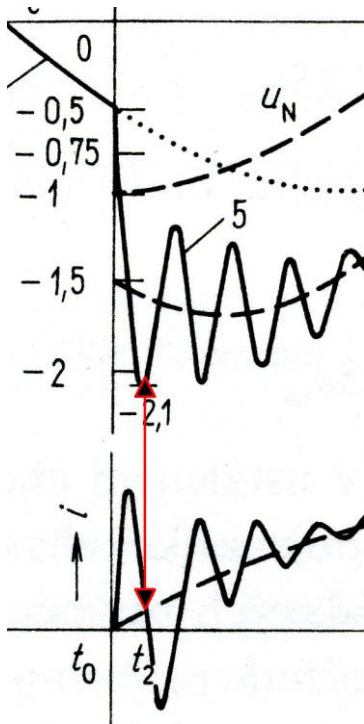
$$u_{MAX} = u_u(0) + u_V(0) = -1.5u_m + (-0.75u_m) \approx -2.25u_m$$

Pokud bychom neuvažovali ani vliv paralelního připojení mezifázových kapacit:

$$u_{MAX} = u_u(0) + (u_u(0) - u(0)) = -1.5u_m + (-1.5u_m - (-0.5u_m)) \approx -2.5u_m$$

K následnému přerušení oblouku může dojít při průchodu proudu nulovou hodnotou, tedy ve dvou variantách času  $t_1$  a  $t_2$  v závislosti na intenzitě tlumení.

## Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase $t_2$ dle teorie Petersena



V čase  $t_2$  má fázové napětí velikost:

$$u_{MAX} = u_u(0) + 0.8 \cdot u_V(0) \approx -2.1u_m$$

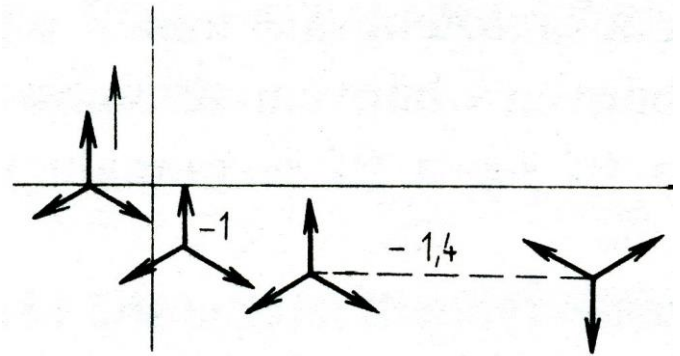
Po přerušování zemního spojení zůstane na kapacitách zdravých fází náboj (platí pro fáze B i C):

$$Q_C = C \cdot u_{MAX}$$

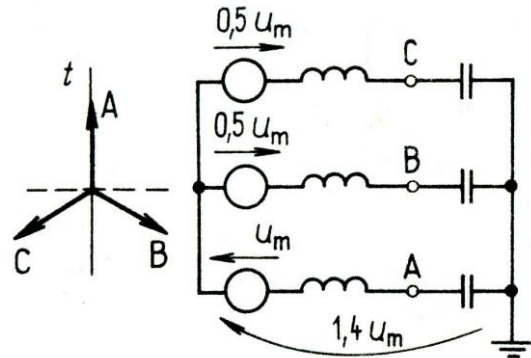
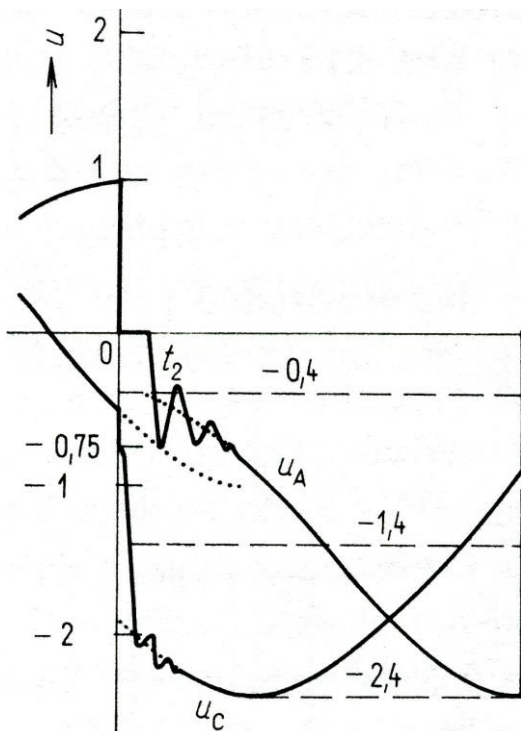
Součtový dvojnásobný náboj se rozdělí rovnoměrně na kapacity všech tří fází, tedy uzel transformátoru bude mít nové napětí:

$$u_N = \frac{1}{3} \cdot \frac{2Q_C}{C} = \frac{2}{3} u_{MAX} = \frac{2}{3} (-2.1u_m) \approx -1.4u_m$$

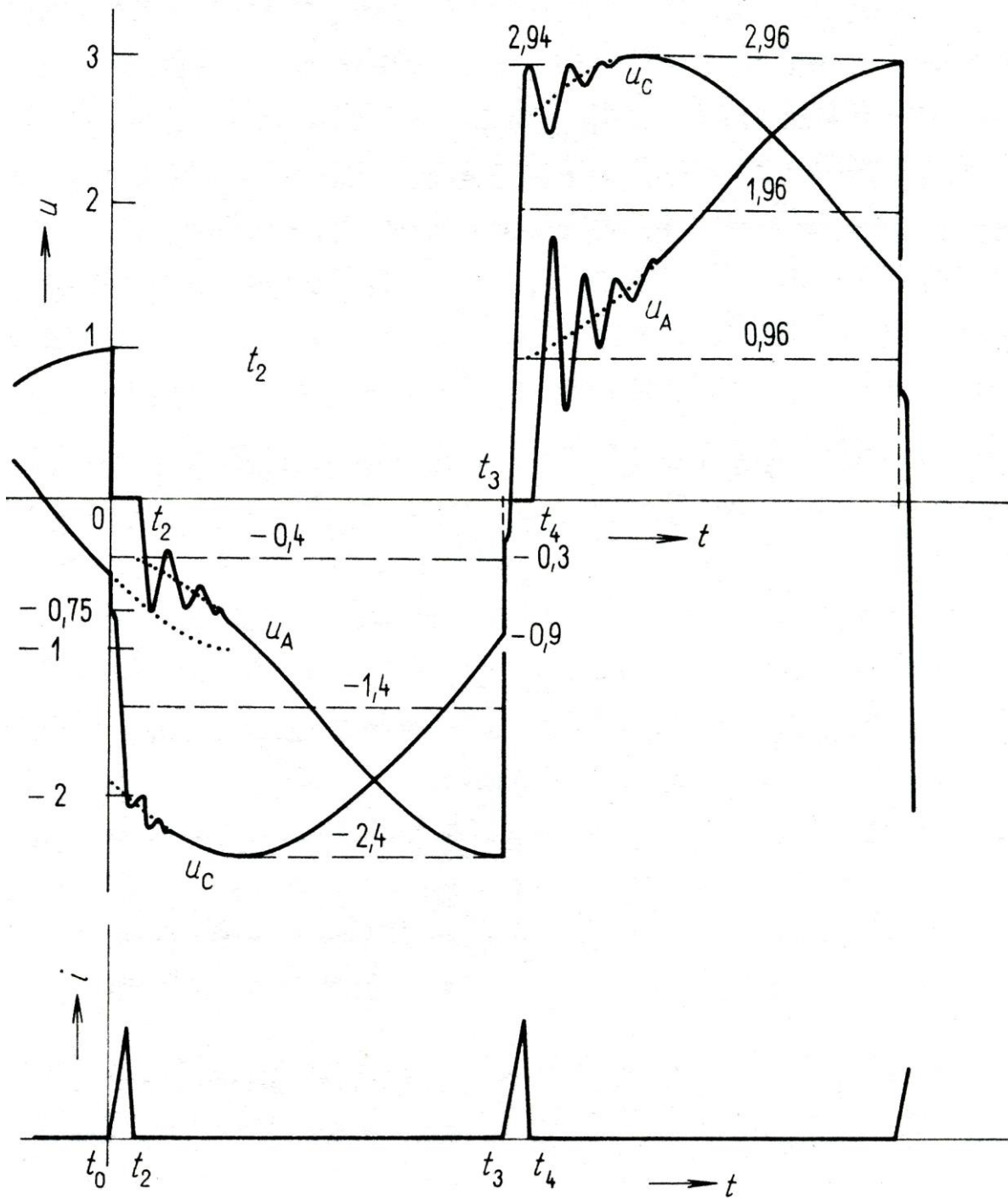
Nadále zanedbáme proces postupného odeznívání tohoto napětí, abychom vyšetřili co nejnepříznivější poměry:



Hodnoty napětí tedy v našem případě oscilují mezi  $-2.4u_m$  a  $-0.4u_m$ . (na novém obrázku mezi  $t_1$  a  $t_2$  pro fáze C i A). Počáteční podmínky odpovídají:



Další možný průraz je pravděpodobný v čase  $t_2$ , kdy je velikost okamžitého napětí fáze A největší:



Tentokrát je napětí na kapacitách odpovídající novým okamžitým podmínkám:

$$u_A(t_2) = -u_m - 1.4u_m = -2.4u_m$$

$$u_B(t_2) = u_C(t_2) = 0.5u_m - 1.4u_m = -0.9u_m$$

$$u_{BA}(t_2) = u_{CA}(t_2) = 0.5u_m + u_m = 1.5u_m$$

Napětí na ekvivalentní kapacitě:

$$u_{ekvB}(t_2) = u_{ekvC}(t_2) = \frac{-0.9u_m C_B + 1.5u_m C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \approx \frac{-0.9 \cdot 3 + 1.5}{3 + 1} u_m = -0.3u_m$$

Okamžitá hodnota nového ustáleného stavu je  $u_u(t_2) = 1.5u_m$  tedy velikost volného přechodného napětí je:

$$u_V(t_2) = u_u(t_2) - u_{ekv}(t_2) = 1.5u_m - (-0.3u_m) = 1.8u_m$$

a maximální okamžitá hodnota napětí vzniklého přechodného děje:

$$u_{MAX} = u_u(t_2) + 0.8 \cdot u_V(t_2) = 1.5u_m + 0.8 \cdot (1.8u_m) \approx 2.94u_m$$

### Zobecnění vztahů pro přerušované zemní spojení

Proveďme zobecnění vztahů pro vznik a zánik zemního spojení v dalších půlperiodách.

Napětí nulového bodu uzlu transformátoru:

$$u_N(t_{ZS-}) = \frac{1}{3} \cdot \frac{2Q_C}{C} = \frac{2}{3} u_{MAX}^{(K)}$$

Napětí na fázích a mezifázové těsně pře vznikem zemního spojení určeno napětími zdroje:

$$u_B(t_{ZS-}) = u_C(t_{ZS-}) = u_N(t_{ZS-}) \pm 0.5u_m \quad u_{BA}(t_{ZS}) = u_{CA}(t_{ZS}) = \pm 1.5u_m$$

Ekvivalentní napětí na paralelně spojených kapacitách:

$$u_{ekvB}(t_{ZS}) = u_{ekvC}(t_{ZS}) = \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}}$$

Okamžitá hodnota nového ustáleného stavu  $u_u(t_{ZS})$  pro obě zdravé fáze a volná složka napětí  $u_V(t_{ZS})$  jsou:

$$u_u(t_{ZS}) = \pm 1.5u_m \quad u_V(t_{ZS}) = u_u(t_{ZS}) - u_{ekv}(t_{ZS})$$

Nové maximální napětí potom:

$$u_{MAX}^{(K+1)} = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_{ZS})$$

Po dosazení:

$$u_{MAX}^{(K+1)} = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot u_V(t_{ZS}) = u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot (u_u(t_{ZS}) - u_{ekv}(t_{ZS}))$$

$$= u_u(t_{ZS}) + K_{TLUM} \cdot \left( u_u(t_{ZS}) - \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \right) =$$

$$\pm 1.5u_m + K_{TLUM} \cdot \left( \pm 1.5u_m - \frac{\left( \frac{2}{3} u_{MAX}^{(K)} \pm 0.5u_m \right) \cdot C_B \pm 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} \right) =$$

$$u_{MAX}^{(K+1)} = \pm \left( 1.5 + \frac{K_{TLUM} \cdot C_B}{C_B + C_{AB}} \right) u_m - \frac{2K_{TLUM} \cdot C_B}{3(C_B + C_{AB})} \cdot u_{MAX}^{(K)}$$

$$\text{Zavedeme: } q = \frac{K_{TLUM} \cdot C_B}{C_B + C_{AB}} \text{ a potom } u_{MAX}^{(K+1)} = \pm (1.5 + q)u_m - \frac{2}{3}q \cdot u_{MAX}^{(K)}$$

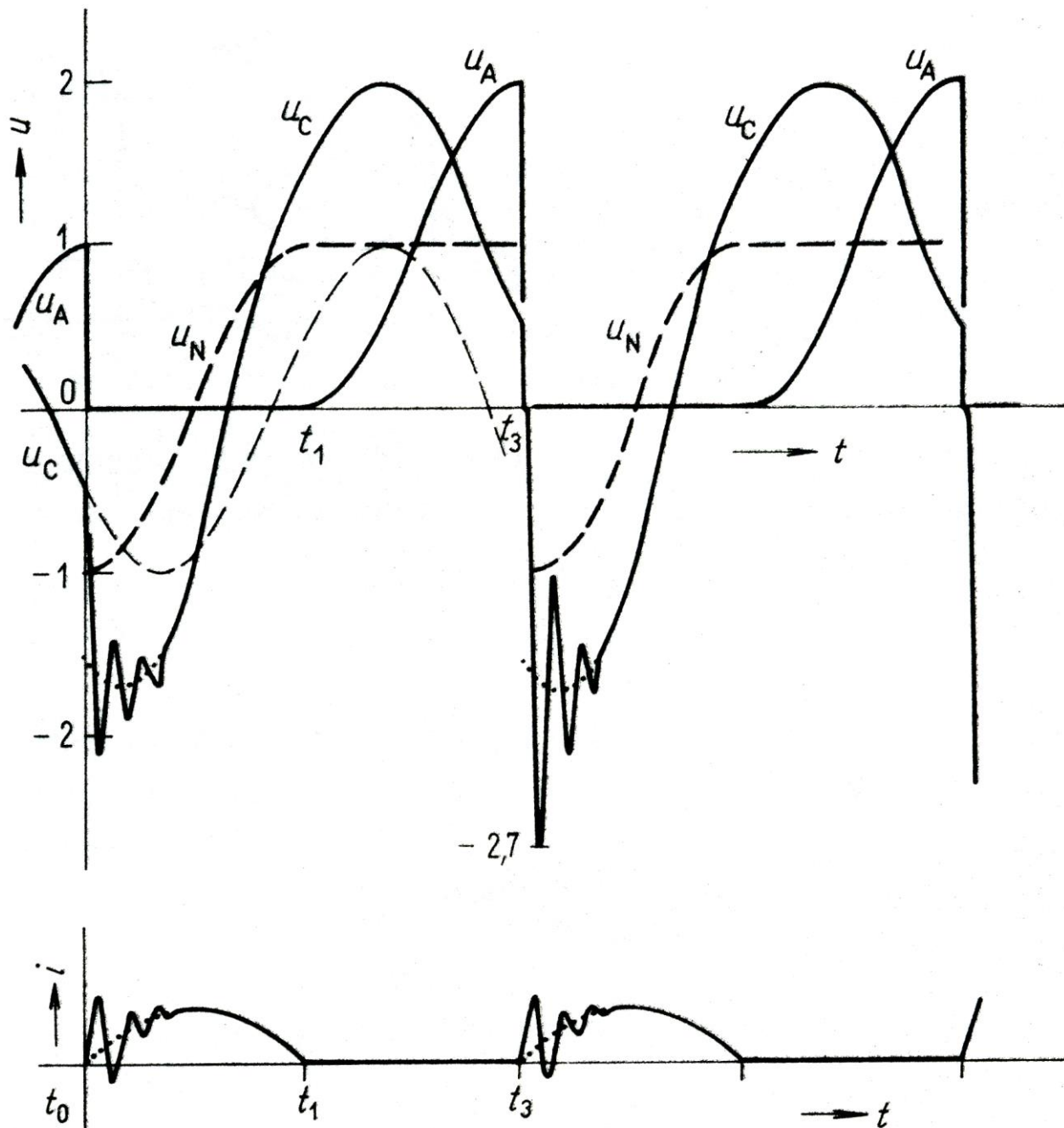
Po ustálení procesu navyšování přepětí budou  $u_{MAX}^{(K+1)}$  a  $u_{MAX}^{(K)}$  stejné, tedy:

$$u_{MAX}^{(N)} = (1.5 + q)u_m + \frac{2}{3}q \cdot u_{MAX}^{(N)} \quad u_{MAX}^{(N)} = \frac{1.5 + q}{1 - \frac{2}{3}q} u_m$$



Po dosažení  $K_{TLUM} = 0.8$ ,  $C_B = 3C_{AB}$  je  $q = 0.6$  a  $u_{MAX}^{(N)} = 3.5u_m$ .  
 Při zanedbání mezifázových kapacit a tlumení přechodného proudu je  
 $q = 1$  a  $u_{MAX}^{(N)} = 7.5u_m$ .

**Přerušované zemní spojení v síti vznikající v čase  $t_1$  dle teorie Peterse a Slepiana**



Zde platí stejná pravidla pro určení  $u_N$ ,  $u_B$  a  $u_{BA}$  jako v předešlém případě.

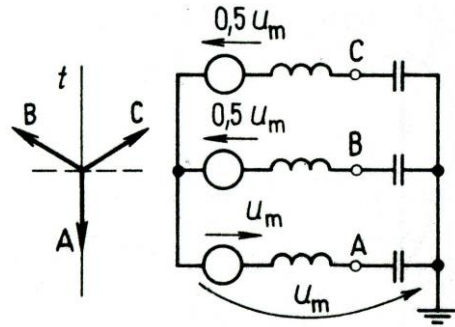
V čase  $t_1$ :

$$u_N(t_1) = \frac{2}{3} u_{MAX}^{(K)} = \frac{2}{3} 1.5u_m = u_m$$

$$u_A(t_1 -) = u_N(t_1) - u_m = 0$$

$$u_B(t_1 -) = u_C(t_1 -) = u_N(t_1) + 0.5u_m = u_m + 0.5u_m = 1.5u_m$$

$$u_{BA}(t_1) = u_{CA}(t_1) = 1.5u_m$$



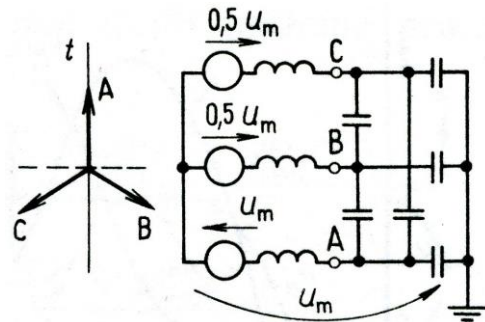
V čase  $t_3$ :

$$u_N(t_3) \approx u_m$$

$$u_A(t_3 -) = u_N(t_3) + u_m = 2u_m$$

$$u_B(t_3 -) = u_C(t_3 -) = u_N(t_3) - 0.5u_m = u_m - 0.5u_m = 0.5u_m$$

$$u_{BA}(t_3) = u_{CA}(t_3) = -1.5u_m$$



$$u_{ekvB}(t_3) = \frac{u_B(t_{ZS}) \cdot C_B + u_{BA}(t_{ZS}) \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = \frac{0.5u_m \cdot C_B - 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}}$$

$$u_{ekvB}(t_3) \approx \frac{0.5u_m \cdot 3 \cdot C_{AB} - 1.5u_m \cdot C_{AB}}{C_B + C_{AB}} = 0$$

$$u_u(t_3) = \pm 1.5u_m = -1.5u_m \quad u_v(t_3) = u_u(t_3) - u_{ekv}(t_3) = -1.5u_m - 0 = -1.5u_m$$

$$u_{MAX} = u_u(t_3) + K_{TLUM} \cdot u_v(t_3) = -1.5u_m + 0.8 \cdot (-1.5u_m) = -2.7u_m$$

Protože je další cyklus téměř shodný s předcházejícím, přepětí se nadále nenavysňuje.

Při zanedbání mezifázových kapacit a tlumení přechodného proudu je velikost volné složky:

$$u_v(t_3) = u_u(t_3) - u_c(t_3) = -1.5u_m - 0.5u_m = -2u_m$$

A příslušné přepětí porovnatelné s předchozím případem:

$$u_{MAX} = u_u(t_3) + u_v(t_3) = -1.5u_m + (-2u_m) = -3.5u_m$$

Pro rozsáhlé síť s velkou kapacitou se ovšem uzel transformátoru provozuje jako kompenzovaný, což pozitivně snižuje vznikající přepětí.