

№7 ДӘРІС

7 апта – «Екі фазалық қысқа тұйықталу орнындағы токтар мен кернеулер» (2 сағат).

Дәрістің мақсаты:

Екі фазалық қысқа тұйықталу орнындағы токтар мен кернеулерін оқып үйрену.

7.1. Жалпы ескертулер

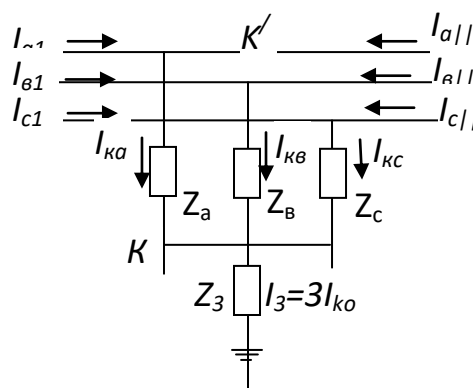
Үш фазалы еркін нүктесіндегі симметриялы емес көлденең жалпы түрде осы нүктені бірдей емес кедергімен қосылу түрінде беріледі (сур.7.1).

Егер өзара әсер индукцияны еске алмасақ, онда симметриялы емес фазалық кернеудің шамасы мына түрде анықталады

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}'_{KA} &= \underline{z}_A I_{KA} + 3z_3 I_{K0} \\ \underline{u}'_{KB} &= \underline{z}_B I_{KB} + 3z_3 I_{K0} \\ \underline{u}'_{KC} &= \underline{z}_C I_{KC} + 3z_3 I_{K0} \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Фазалық тоқ пен кернеуді симметриялы құраушылармен алмастырып (1.66) теңдеулер жүйесін шешетін болсақ, әр тізбекті кернеу үшін:

$$U_{KA1} = \frac{1}{3} \left[z_A (I_{KA1} + I_{KA2} + I_{K0}) + az_a (a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{K0}) + \right. \\ \left. + a^2 z_C (a I_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{K0}) \right] \quad (7.2)$$



7.1 – сур. Үшфазалы жүйедегі көлденең симметриялы емесік

$$U_{KA2} = \frac{1}{3} \left[z_A (I_{KA1} + I_{KA2} + I_{K0}) + az_a (a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{K0}) + \right. \\ \left. + az_C (a I_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{K0}) \right] \quad (7.3)$$

$$U_{K0} = \frac{1}{3} \left[z_A (I_{KA1} + I_{KA2} + I_{K0}) + z_a (a^2 I_{KA1} + a I_{KA2} + I_{K0}) + \right. \\ \left. + z_C (a I_{KA1} + a^2 I_{KA2} + I_{K0}) \right] \quad (7.4)$$

Бұл теңдеулер жүйесі (7.2)-(7.4) теңдеумен қатар симметриялы тоқ пен кернеуді симметриялы емес нүктеге қатысты әр фазаға сәйкес анықтауға болады.

7.2. Екі фазалы қысқаша тұйықталу

Екі фазалы қысқа тұйықталу ВС фазаның арасында r_g кедергісі арқылы доға пайда болады (сур. 7.2). Шекті шартты жазамыз:

$$\underline{I}_{KA}^{(2)} = 0 \quad (7.5)$$

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = -\underline{I}_{KC}^{(2)}$$

$$K \text{ нүктесінде} \quad U_{KB}^{(2)} - U_{KC}^{(2)} = 0 \quad (7.6)$$

$$K' \text{ нүктесінде} \quad U_{K'B}^{(2)} - U_{K'C}^{(2)} = I_{KB} r_g \quad (7.7)$$

Егер жүйенің тоғы теңдікте болғандықтан $I_{K0} = 0$ (7.5) теңдіктен

$$\underline{I}_{KA} = I_{KA1} + I_{KA2} = 0 \quad (7.8)$$

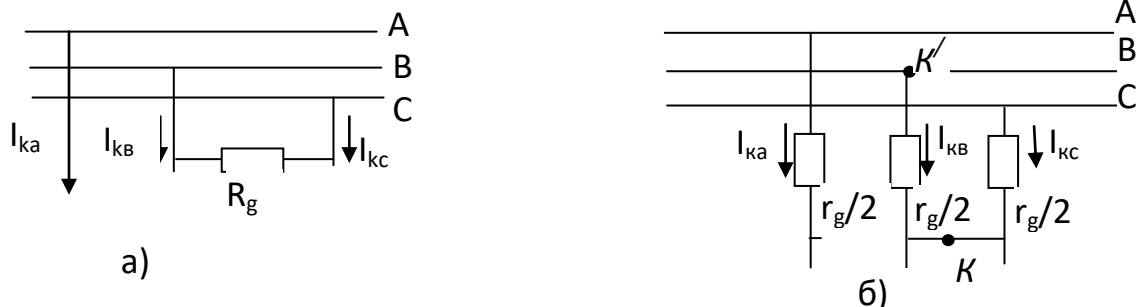
бұдан $I_{KA2} = -I_{KA1}$.

U_{KB} және U_{KC} кернеуін A фазасындағы кернеудің симметриялы құраушысы арқылы жазамыз (7.7) теңдіктен

$$a^2 U_{KA1} + a U_{KA2} + U_{K0} - a U_{KA1} - a^2 U_{KA2} - U_{K0} = (a^2 - a)(U_{KA1} - U_{KA2}) = 0$$

бұдан

$$U_{KA2} = U_{KA1}. \quad (7.9)$$



7.2 – сур. Екі фазалы қысқаша тұйықталу

Бұл жағдай алдыңғы жазылған теңдеулер жүйесіндегі оң жақтарды теңестіруге мүмкіндік береді.

$$E_{A\Sigma} = -(z_{1\Sigma} + \frac{r_g}{2}) \underline{I}_{KA1} = -(z_{2\Sigma} + \frac{r_g}{2}) \underline{I}_{KA2},$$

(7.8) теңдікті еске алсақ

$$\underline{I}_{KA1}^{(2)} = \frac{E_{A\Sigma}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma} + r_g} \quad (7.10)$$

Қысқа тұйықталу нүктесіндегі бұзылған фазаның тоғы $I_{KA1}^{(2)}$ арқылы мына түрде анықталады

$$\underline{I}_{KB}^{(2)} = a^2 \underline{I}_{KA1}^{(2)} + a \underline{I}_{KA2}^{(2)} = (a^2 - a) \underline{I}_{KA1}^{(2)} + j\sqrt{3} \underline{I}_{KA1}^{(2)}$$

$$\underline{I}_{KC}^{(2)} = -\underline{I}_{KB}^{(2)} = j\sqrt{3} \underline{I}_{KA1}^{(2)}. \quad (7.11)$$

K нүктесіндегі симметриялы құраушының кернеуі және r_g еске алғанда

$$U_{KA2} = -(Z_{2\Sigma} + \frac{r_g}{2})I_{KA2} = (Z_{2\Sigma} + \frac{r_g}{2})I_{KA1} = U_{KA1} \cdot \quad (7.12)$$

U_{K0} кернеуі кез келген мәнге ие болады. Себебі I_0 тоғына жол жоқ, ендеше

$z_{0\Sigma} = \infty$ онда $z_{K0} = -z_{0\Sigma} \cdot I_{K0}^{(2)} = -\infty$; яғни анықталмайды.

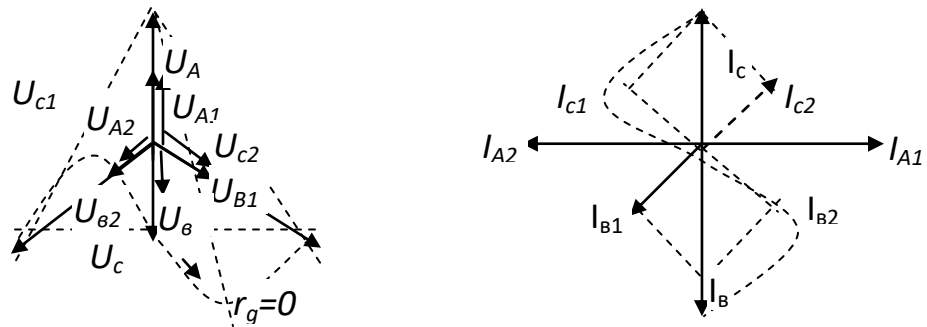
K нүктесіндегі фазалық кернеу шамасы мынаған тең

$$U_{KA}^{(2)} = U_{KA1}^{(2)} + U_{KA2}^{(2)} = 2U_{KA1}^{(2)} = 2(Z_{2\Sigma} + \frac{r_g}{2})I_{KA1} \cdot \quad (7.13)$$

$$\underline{u}_{KB}^{(2)} = \underline{u}_{KC}^{(2)} = a^2 \underline{u}_{KA1}^{(2)} + a \underline{u}_{KA2}^{(2)} = (a^2 + a) \underline{u}_{KA1}^{(2)} = -\underline{u}_{KB1}^{(2)} = -\frac{\underline{u}_{KA}^{(2)}}{2} \cdot \quad (7.14)$$

Доға кедергісіндегі симметриялы құраушылар кернеуі:

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_{KA1}^{(2)} &= (r_g + z_{2\Sigma}) I_{KA1}^{(2)} \\ \underline{u}_{K'A2}^{(2)} &= z_{2\Sigma} I_{KA1}^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (7.15)$$



7.3 – сур. Векторлық диаграмма

Алынған шамалар арқылы қысқа тұйықталу орнындағы кернеу мен тоқ үшін векторлық диаграмма тұрғызамыз (сур. 7.3). Бұл кезде $r_g = 0$

Егер $r_g \rightarrow 0$ тоқтық кернеудің векторының соңы шеңбердің доғасының бойымен орын ауыстырады.

7.3. Бір фазалы қысқаша тұйықталу

A фазасындағы қысқа тұйықталу r_A доғасы арқылы болады (сурет 7.2); сонан соң шекті шарт

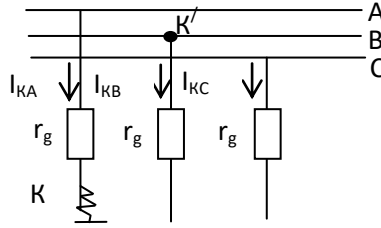
$$I_{KB}^{(1)} = 0 \quad (7.16)$$

$$I_{KC}^{(1)} = 0 \quad (7.17)$$

$$U_{KA}^{(1)} = 0 \quad (7.18)$$

$U_{KC}^1 = r_g I_{KA}^{(1)}$ (K' -нүкт.) (7.18) және (7.17) теңдігінен жерге бекітілген фаза үшін.

$$I_{KA_1} = I_{KA_2} = I_{K_0} = \frac{1}{3} I_{KA}. \quad (7.19)$$



7.4 - сур. Бір фазалы қысқаша тұйықталу сұлбасы

Бұған симметриялы құраушылар кернеуінің шамасын қоямыз, онда (7.14) теңдік пен (7.8) теңдікті еске алып

$$E_{A\Sigma} - I_{KA_1} (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_g) = 0$$

бұдан

$$I_{KA_1}^{(1)} = \frac{E_{A\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_g}. \quad (7.20)$$

Бұзылған фаза үшін ток

$$I_{KA_1}^{(1)} = 3I_{KA_1}^{(1)} \quad (7.21)$$

K нүктесіндегі симметриялы құраушылар кернеуі

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{KA_1} &= E_{A\Sigma} - (r_g + Z_{1\Sigma}) I_{KA_1} = (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_g) I_{KA_1}, \\ \underline{U}_{KA_2} &= 0 - (r_g + Z_{2\Sigma}) I_{KA_2} = -(Z_{2\Sigma} + r_g) I_{KA_1}, \\ \underline{U}_{K_0} &= 0 - (r_g + Z_{0\Sigma}) I_{K_0} = -(Z_{0\Sigma} + 2r_g) I_{KA_1}, \end{aligned} \right\} \quad (7.22)$$

K' нүктесіндегі доға кедергісі үшін

$$\left. \begin{aligned} U_{KA_1} &= I_{KA_1} (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_g) \\ U'_{KA_2} &= -I_{KA_1} Z_{2\Sigma} \\ U'_{KA_1} &= -I_{KA_1} Z_{0\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (7.23)$$

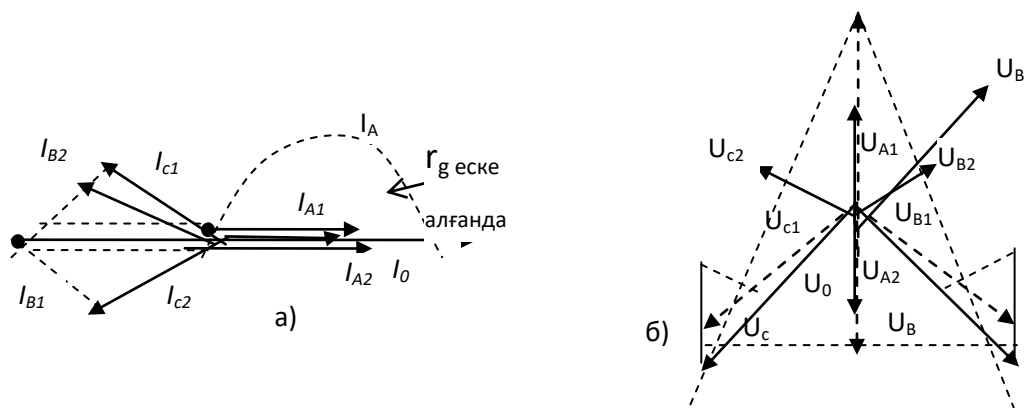
K нүктесіндегі жерге қатысты фазалық кернеу

$$\begin{aligned} U_{KB}^{(1)} &= aU_{KA_1}^{(1)} + a^2U_{KA_2}^{(1)} + U_{K_0}^{(1)} = \\ &= [(a^2 - a)Z_{2\Sigma} + (a^2 - 1)Z_{0\Sigma} + a^2 3r_g] I_{KA_1} \end{aligned} \quad (7.24)$$

$$\begin{aligned} U_{KC}^{(1)} &= aU_{KA_1}^{(1)} + a^2U_{KA_2}^{(1)} + U_{K_0}^{(1)} = \\ &= [(a - a^2)Z_{2\Sigma} + (a - 1)Z_{0\Sigma} + a 3r_g] I_{KA_1} \end{aligned} \quad (7.25)$$

r_g кедергісіндегі $U_{K'/B}$ және $U_{K'/C}$ кернеуі бірдей, ендеше

$$\underline{U}_{K'/A}^{(1)} = r_g I_{KA} = 3r_g I_{KA} \quad (7.26)$$



7.5 - сур. Векторлық диаграмма

7.4. Тура тізбектіліктің эквиваленттілігінің ережесі

Жоғарғыда айтылғандай қысқаша тұйықталу тоғы және кернеуі барлық тізбектілікте қысқа тұйықталу орнындағы токтың тура тізбектілігіне пропорционал болады. Сондықтан жалпы жағдайда A фазасы үшін тура тізбектілік тоғы кез келген түрінде симметриялы емес қысқа тұйықталу үшін мына түрде жазылады

$$I_{KA_1}^{(n)} = \frac{E_{A\Sigma}}{jX_{1\Sigma} + Z_{\Delta}^{(n)}} \quad (7.27)$$

мұндағы $Z_{\Delta}^{(n)}$ - қысқа тұйықталуға байланысты қосымша кедергі.

Сонымен тура тізбектіліктің ережесі мынандай: симметриялы емес қысқаша тұйықталудың тура тізбектілігінің тоғы, үш фазаның қысқа тұйықталу нүктесіндегі тоғы сияқты анықталады, яғни негізгі алыс қосымша кедергі Z_{Δ}'' арқылы жазылады. Ол тура тізбектіліктің схемасының параметріне байланысты емес және қорытынды кедергінің түрінен анықталады. Бұл ереже симметриялы емес қысқа тұйықталудың негізгі гармоникасы үшін анықталады.

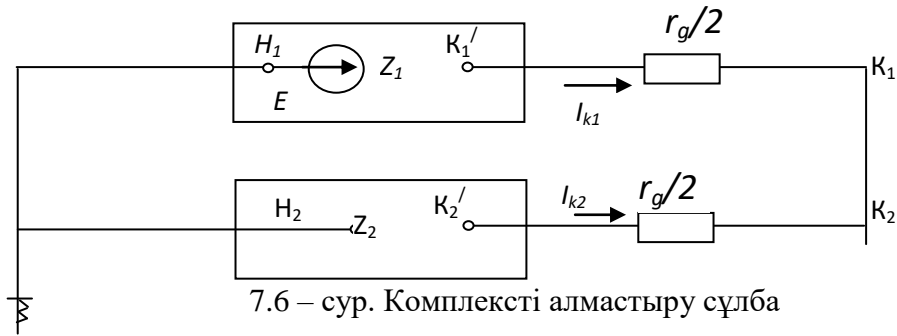
Кесте 7.1

Қысқа тұйықталу түрінің көрсетілуі

Қысқа тұйықталу түрі	n	$Z_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Үш фазалы	3	0	1
Екі фазалы	2	$Z_{2\Sigma} + r_g$	$\sqrt{3}$
Бір фазалы	1	$Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3r_g$	3
Екі фазалы жерге бекітілген	1,1	$(R_g + (Z_{2\Sigma} + r_g)/(Z_{0\Sigma} + r_g + 3r_{g3}))$	$\left a^2 - \frac{Z_{2\Sigma} + r_g + a(Z_{0\Sigma} + r_g + 3r_{g3})}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2r_g + 3r_{g3}} \right $
Егер $r_g=0$ $r_{g3}=0$	1,1	$X_{2\Sigma}/X_{0\Sigma}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} * X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

мұндағы m - коэффициент

7.5. Комплексті алмастыру сұлба және қысқаша тұйықталу түрін салыстыру



Орнықталған қысқа тұйықталу орнындағы кернеудің симметриялы құраушысының қатынасы, қысқаша тұйықталудың әр түрі үшін бөлек тізбектіліктің схемасымен қосуға мүмкіндік береді және әр қысқа тұйықталу түріне комплексті сұлбасын құрайды. Мысалы, доға арқылы екі фазалы қысқа тұйықталу үшін комплексті алмастыру сұлбасы 7.6 суретте көрсетілген.

Тура тізбектіліктің эквивалентті ережесі және $Z_{\Delta}^{(n)}$, m орнықталған мәні әр түрлі қысқа тұйықталу түрін салыстыруға мүмкіндік береді. Қысқаша тұйықталу бір нүктеде әр түрлі жағдайда болсын деп ойлайық, яғни индуктивті тізбек шартында ол кездегі кедергі үшін

$$X_{\Delta}^{(1)} \succ X_{\Delta}^{(2)} \succ X_{\Delta}^{(1,1)} \succ X_{\Delta}^{(3)} = 0 \quad (7.28)$$

Ол кездегі тоқ пен кернеу

$$I_{K_1}^{(1)} \prec I_{K_1}^{(2)} \prec I_{K_1}^{(1,1)} \prec I_{K_1}^{(3)}, \quad (7.29)$$

$$U_{K_1}^{(1)} \succ U_{K_1}^{(2)} \succ U_{K_1}^{(1,1)} \succ U_{K_1}^{(3)} = 0. \quad (7.30)$$

Сонымен қатар мына жағдайды көрсетуге болады

$$T_d^{(1)} \succ T_d^{(2)} \succ T_d^{(1,1)} \succ T_d^{(3)}. \quad (7.31)$$

Басқа симметриялы емес қысқаша тұйықталуды қарастырғанда, бұл кезде үш фазалы қысқаша тұйықталу өтпелі тоғы тез өшеді. Әр түрлі симметриялы емес үш фазалы қысқаша тұйықталу тоғы үшін

$$K = m^{(n)} \frac{E^{(n)}}{E^{(3)}} \frac{1}{1 + \frac{x_{\Delta}^{(n)}}{x_{1\Sigma}}}, \quad \text{егер } (x_{\text{вн1}} \succ x_{\text{кр1}}) \quad (7.32)$$

$$K = m^{(n)} * \frac{U_i}{\dot{A}_i} \frac{X_{1\Sigma}}{X_{\text{ан1}} + X_n^{(n)}}, \quad \text{егер } (x_{\text{вн1}} \prec x_{\text{кр1}}) \quad (7.33)$$

егер ҚАБ жоқ болса, онда

$$K = m^{(n)} \frac{1}{1 + \frac{X_{\Delta}^{(n)}}{X_{1\Sigma}}}, \quad (7.34)$$

Екі фазалы қысқаша тұйықталу $0 \leq K \leq 1,6$.

Бұл қысқаша тұйықталу нүктесінен өте үлкен қашықтықта болғанд, онда $K \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2}$ тең. Сондықтан көбінесе $I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K^{(3)} = 0,87 I_K^{(3)}$ қабылданады. Егер бір фазалы қысқа тұйықталу $0 \leq K \leq 3$ болса, онда оның жоғары шегі 2,5 аспайды.

7.6. Қума симметриялы емес бір реттілік

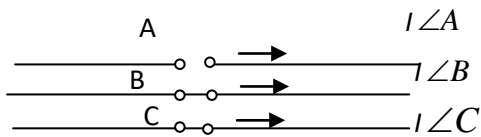
Үш фазалы системаның кез келген нүктесінде симметриялы емес жалпы түрде әр фазадағы бірдей емес кедергі Z_A, Z_B, Z_C арқылы қосылады.

Егер өзара әсер индукциясын еске алсақ, онда

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\angle A} &= Z_A I_{\angle A} \\ \Delta U_{\angle B} &= Z_B I_{\angle B} \\ \Delta U_{\angle C} &= Z_C I_{\angle C} \end{aligned} \right\} \quad (7.35)$$

Симметриялы құраушы арқылы бұл теңдікті симметриялы емес қума үшін мына түрде жазуға болады

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\angle A_1} &= E_{A\Sigma} - Z_{\angle 1\Sigma} I_{\angle A_1} \\ \Delta U_{\angle A_2} &= 0 - Z_{\angle 2\Sigma} I_{\angle A_2} \\ \Delta U_{\angle 0} &= 0 - Z_{\angle 0\Sigma} I_{\angle 0} \end{aligned} \right\} \quad (7.36)$$



$$\Delta U_{\angle A} = Z_A I_{\angle A} \quad (7.37)$$

$$\Delta U_{\angle B} = 0 \quad (7.38)$$

$$\Delta U_{\angle C} = 0 \quad (7.39)$$

7.7 – сур. Бір фазалы
қысқаша түйықталу

Сонымен көлденең, қума симметриялы емес құраушылар бір бірінен бөлек болмайды. Мысал үшін бір фазаның (A) үзілген жағдайын қарастырайық (сур. 7.7).

Симметриялы құраушыға жіктеу үшін (7.38), (7.39) мына түрде жазылады:

$$\Delta U_{\angle A_1} = \Delta U_{\angle A_2} = \Delta U_{\angle 0} = \frac{1}{3} \Delta U_{\angle A} \quad (7.40)$$

онда (7.37) – дан

$$3\Delta U_{\angle A_1} = Z (I_{\angle A_1} + I_{\angle A_2} + I_{\angle 0}) \quad (7.41)$$

(7.37), (7.38) теңдіктен (7.39), (7.41) мына түрде жазылады

$$\underline{E}_{\angle A_2} = -\frac{\Delta U_{\angle A_1}}{Z_{\angle 2\Sigma}} \quad (7.42)$$

$$\underline{I}_{\angle 0} = -\frac{\Delta U_{\angle A_1}}{Z_{\angle 0\Sigma}} \quad (7.43)$$

(7.42), (7.43) - ні (7.41)- ға қойсақ, онда

$$\Delta U_{\angle A_1} = Z_{\Delta\angle}^{(1)} I_{\angle A_1} \quad (7.44)$$

$$\text{Бұдан} \quad Z_{\Delta\angle}^{(1)} = \frac{1}{\frac{3}{Z} + \frac{1}{Z_{\angle 2\Sigma}} + \frac{1}{Z_{\angle 0\Sigma}}} \quad (7.45)$$

фаза үзілген кезде $Z = \infty$

$$\underline{I}_{\angle A_1} = \frac{E_{A_\Sigma}}{Z_{\angle 1\Sigma} + Z_{\Delta\angle}^{(1)}}, \quad (7.46)$$

$$\underline{I}_{\angle A_2} = -\frac{Z_{\Delta\angle}^{(1)}}{Z_{\angle 2\Sigma}} I_{\angle A_1}, \quad (7.47)$$

$$\underline{I}_{\angle A_0} = -\frac{Z_{\Delta\angle}^{(1)}}{Z_{\angle 0\Sigma}} I_{\angle A_1}. \quad (7.48)$$

Анықталған мәндердегі тоқ пен кернеудің векторлық диаграммасын тұрғызуға болады, ол үшін фазалық тоқтың шамасын анықтаймыз

$$\underline{I}_{\angle A} = 0 \quad (7.49)$$

$$\underline{I}_{\angle B} = a^2 I_{B_1} + a I_{A_2} + I_0 \quad (7.50)$$

$$\underline{I}_{\angle 0} = a I_{\angle A_1} + a^2 I_{\angle A} + I_{\angle 0} \quad (7.51)$$

Бұл басқа да симметриялы емес шамалар үшін орындалады. Анықталған шама бұл жағдайды көрсетуімен қатар осы уақытта тура тізбектіліктің эквивалентті ережесін қанағаттандырады. Сонымен қатар көлденең симметриялы емес үшін тура тізбектіліктің тоғы симметриялы емес орында мына түрде табылады

$$\underline{I}_{\angle 1}^{(n)} = \frac{E_\Sigma}{Z_{1\Sigma} + Z_{0\angle}^{(n)}}. \quad (7.52)$$

Тура тізбектіліктің симметриялы емес бөлігіндегі кернеудің түсуі

$$\Delta U_{\angle 1}^{(n)} = Z_{\Delta\angle}^{(n)} * I_{\angle 1}^{(n)} \quad (7.53)$$

мұндағы n - симметрияның түрін көрсетеді.

Зақымданудың күрделі түрі бірнеше симметриялы емес тұйықталудың қосындысы немесе қума симметриялы еместің бұзылуы болады. Тәжірибе жүзінде симметриялық бұзылу бір уақытта жүйенің екі нүктесінде болады. Кез келген күрделі бұзылудың симметриялы құраушы қолданылады. Екі еселік симметриялы емес үшін 12 белгісізді, 12 теңдеу шешілуі керек. Симметриялы құраушы тоқ пен кернеу симметриялы емес әр нүкте үшін анықталады. Жалпы санның жартысына шекті шарт қолданылады.

Пайдаланған әдебиеттер тізімі

1. Абибаева Р.Ш., Онгар Б. Электр энергетикадағы өтпелі кезеңдер: Оқу құрал. – Алматы: 2021. – 120 б. <http://surl.li/aidbm>
2. Шабад В.К. Переходные электромеханические процессы в электроэнергетических системах. М.:Академия, 2013.
3. В.Н. Сажин, К.К. Тохтибакиев, Кнь О.А. Электрэнергетикадағы өтпелі кезеңдер. 5В071800 – Электроэнергетика мамандықтары үшін дәріс жинағы.- Алматы: АУЭС, 2011, - 62 бет.
4. С.М. Силюк, В.А. Булат, Е.В. Булойчик. Сборник задач по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы» и «Переходные процессы в электроэнергетических системах», Минск 2010, - 73с.
5. Садырбаев, Ш.А. Методические указания к СРСП по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетике»: для студентов специальности 5071800- Электроэнергетика. Алмты: КазТК, 2013 г.

6. Утешкалиева Л.Ш. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетике»: для студентов специальности 5071800-Электроэнергетика. Алматы: КазТК, 2012 г.

Бақылау сұрақтары

1. КЗ тогының апериодты құраушысының бастапқы мәні;
2. Периодты ток құраушысы амплитудасының шарттарын атаңыз?
3. КЗ екпінді ток есептеу тәсілі;
4. КЗ тогының апериодты құраушысын жақын есептеу әдісі;
5. Токтың периодты құраушысының бастапқы нақты мәні.

БӨЖ –ның тапсырмалары:

ҚТ түрлерін салыстыру. Презентация дайындау