

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА "ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА"

Р А З Р А Б О Т Е Н И В Ъ П Р О С И

З А Д Ъ Р Ж А В Е Н И З П И Т

на образователно-квалификационна степен: "БАКАЛАВЪР",

по специалност: "ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА И ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ",

модул: "ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА"

(въпроси от 49 до 58)

Съставил: проф. д.т.н. инж. мат. Крум Костов Герасимов

В а р н а

2 0 0 2

Rev. 12.06.2009

СЪДЪРЖАНИЕ

49. Общи сведения за късите съединения (к.с.) в ЕЕС. Съставки и характерни величини на тока на к.с. Мощност на к.с.	3
50. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми на ЕЕС за изчисляване на режимите на к.с. в разпределителните мрежи	5
51. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми за изчисляване на режимите на к.с. в преносните мрежи високо напрежение и в уредбите на генераторно напрежение	7
52. Изчисляване на характерните величини на трифазно к.с. на шините на трансформатор захранван от шини с "твърдо" напрежение. Диапазон на изменение на характерните величини за системните и мрежовите трансформатори	9
53. Изчисляване на характерните величини на тока на трифазно к.с. на шините на генератор. Диапазон на характерните величини на тока на к.с. при генератори с и без АРВ	11
54. Изчисляване на характерните величини на тока на режима на трифазно к.с. в разпределителни мрежи. Нива на мощността на к.с.	13
55. Изчисляване на характерните величини на режима на трифазно к.с. в уредби за генераторно напрежение и в преносните мрежи за високо напрежение. Диапазони на мощността на к.с. за различните нива на напрежението	15
56. Изчисляване на несиметрични къси съединения в ЕЕС чрез правилото за еквивалентност на правата последователност. Комплексни заместващи схеми. Векторни диаграми на тока и напрежението в мястото на к.с.	18
57. Съотношение между режимните параметри за режимите на различните видове къси съединения. Диапазони, регулиране на съотношенията, разпределение на симетричните съставлящи на напреженията	20
58. Изчисляване на ефективните стойности на режимните параметри на земно съединение в мрежи с различно заземяване на звездния център	22

49. Общи сведения за късите съединения (к.с.) в ЕЕС. Съставки и характерни величини на тока на к.с. Мощност на к.с.

Общи сведения. В зависимост от големината на преходното съпротивление в мястото на к.с. ($R_{пр}$) късите съединения биват: - метални к.с. при $R_{пр} \approx 0$; - к.с. през електрическа дъга ($R_{пр} = R_d$). В зависимост от броя на участващите в к.с. фази к.с. биват: - трифазно ($K^{(3)}$); - двуфазно ($K^{(2)}$); - еднофазно ($K^{(1)}$); - двуфазно и към земя ($K^{(1,1)}$).

Електрическата верига от източника на е.д.н. до мястото на к.с. се нарича късосъединена верига. Електрическата отдалеченост на к.с. от генераторите се измерва със съпротивлението на късосъединената верига Z_k .

Характерно за режима на к.с. е значително понижаване на напрежението в мястото на к.с. и в елементите с малка електроотдалеченост от к.с. (например при трифазно к.с. $U_k^{(3)} = 0$), и повишаване на тока в късосъединените вериги. Повишеният ток води до повишаване на термичното и динамично натоварване на тоководите на елементите. Пониженото напрежение води до понижаване на енергообмена между генераторите и потребителите и смущава тяхната работа. Последствията от тези процеси зависят от мястото и продължителността на к.с. При к.с. с голяма електроотдалеченост (в разпределителните мрежи) последствията са местни, а при малка електроотдалеченост - са от значение за цялата ЕЕС, като може да се стигне и до нарушаване на синхронната паралелна работа на генераторите. За отбелязване е, че неуравновесените магнитни потоци при несиметричните к.с. могат да индуктират напрежения в съоръжения, които не са елементи на ЕЕС със съответни последствия.

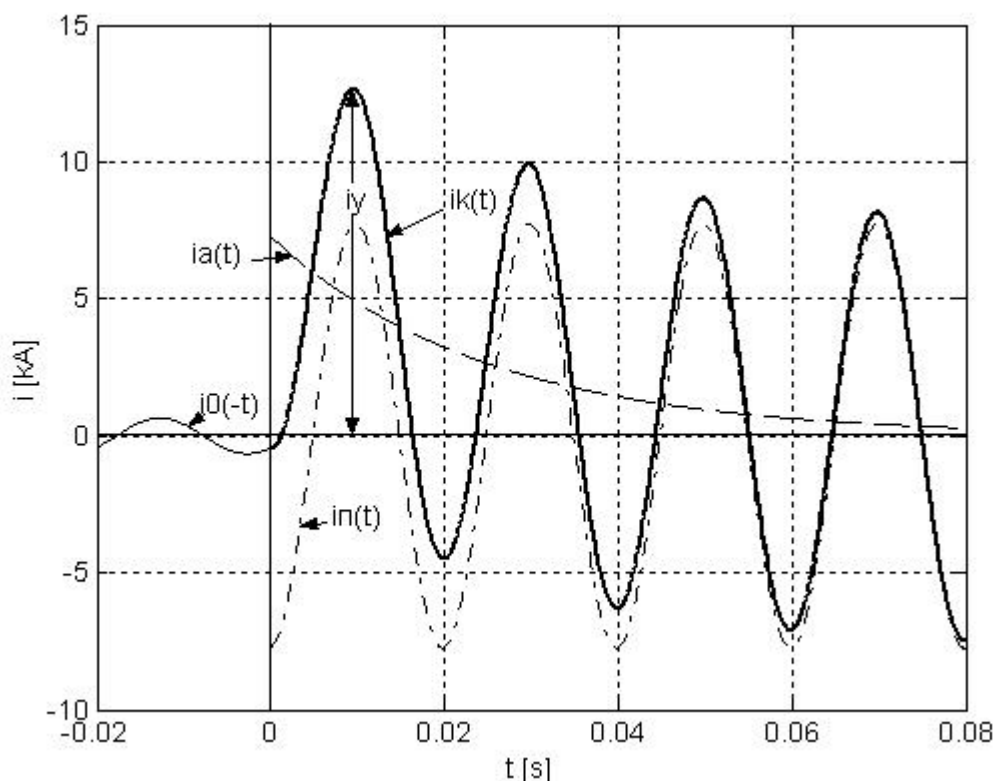
Съставки и характерни величини на тока на к.с.(т.к.с.).

Токът в късосъединената верига (i_k) може да се разложи на периодична (i_p) и аperiodична (i_a) съставяща. При трифазно к.с. захранвано от идеален източник на е.д.н. (източник с безкрайна мощност, наричан още шини с "твърдо" напрежение) периодичната съставяща е една. Тя е с честотата на източника и е с постоянна амплитуда. Ако източника е реален генератор, периодичните съставящи са две - с основна честота i_p и с удвоена честота $i_{p,2\omega}$. Двете съставящи са с променящи се амплитуди, като $i_{p,2\omega}$ затихва до нула. А при несиметричните къси съединения възниква пълен спектър от хармоници на i_p . В инженерните методики хармоничните съставящи не се отчитат. Аperiodичната съставяща затихва до нула по експонента с времеконстантата на късосъединената верига (T_a). Началните стойности на i_a ($i_{a(0)}$) са различни в трите фази и зависят от момента на възникване на к.с.

Най-голямата моментна стойност на i_k се нарича ударен ток (i_y). Той е различен в трите фази и възниква в различни моменти от стадия на к.с. Извежда се следното изчислително условие, при което се получава най-голям i_y - веригата да е на празен ход и момент на възникване на к.с., при който $i_{a(0)} = -i_{max,p}$. Тогава i_k в изчислителната фаза, при захранване от шини "твърдо" напрежение ще се определи чрез израза

$$(49.1) \quad i_{k(t)} = i_{\max, \Pi} \left(e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega t) \right), \quad \text{а } i_y -$$

(49.2) $i_y = k_y \cdot i_{\max, \Pi}$; $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$ се нарича ударен коефициент на късосъединената верига и е в границите $1 < k_y < 2$. На фиг. 49.1. е показано графичното изменение на i_k и съставлящите му.



Фиг. 49.1.

Ефективната стойност на т.к.с. (I_k) се определя чрез израза

$$(49.3) \quad I_{k(t)} = \sqrt{I_{\Pi(t)}^2 + I_{a(t)}^2}, \quad \text{където } I_{\Pi(t)} = \frac{i_{\max, \Pi(t)}}{\sqrt{2}} \text{ е ефективната стойност на периодичния ток, а } I_{a(t)} = i_{a(t)} \text{ - на аperiодичния.}$$

$I_{k(t=0,01)}$ се нарича ефективна стойност на ударния ток т.е. $I_y = I_{k(t=0,01)}$. Трябва да се знае, че $I_y \neq \frac{i_y}{\sqrt{2}}$.

Мощността на к.с. е изчислителна величина определена по един от следните изрази

$$(49.4a) \quad S_{k(t)}^{(n)} = \sqrt{3} U_{н,к} \cdot I_{k(t)}^{(n)};$$

$$(49.4б) \quad S_{\Pi k(t)}^{(n)} = \sqrt{3} U_{ср,н,к} \cdot I_{\Pi(t)}^{(n)}.$$

където $U_{н,к}$ и $U_{ср,н,к}$ са съответно номиналното и средно номиналното напрежение на мрежата с к.с.

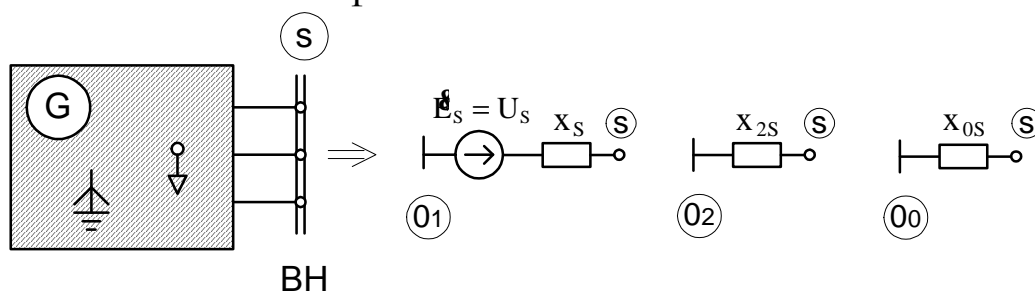
Изразът (49.4a) се прилага при оценка на комутационната способност на апаратите, а (49.4б) за характеризирание на обобщената система.

50. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми на ЕЕС за изчисляване на режимите на к.с. в разпределителните мрежи

Заместващата схема на ЕЕС се съставя чрез заместващите схеми на съставните ѝ елементи. Обикновено последните са известни за симетричните координати, т.е. за права, обратна и нулева последователност. При трифазно к.с. се използва схемата на правата последователност, при несиметричните и останалите две.

Характерно за разпределителните мрежи за средно напрежение (СН) и ниско напрежение (НН) е: - голяма електрическа отдалеченост от генераторите; - съизмеримост на активните и индуктивните съпротивления на елементите; - обикновено едностранно захранени чрез понижаващи трансформатори. Тези особености се отчитат при съставяне на заместващата схема за режима на к.с. В тази схема захранващата система се представя обобщено към шините за високо напрежение на понижаващата подстанция, а преносните елементи на разпределителната мрежа (трансформатори и електропроводи) се представят само с надлъжно включените им импеданси в заместващите им схеми (напречно включените проводимости Ψ_T и Ψ_W не се отчитат).

Точното обобщаване на захранващата система може да се получи чрез прилагане на теоремата на Тевенен върху подробните ѝ заместващи схеми. В инженерната практика се прилага приблизителен подход. Системата се обобщава със заместващите схеми показани на фиг. 50.1.



Фиг. 50.1.

В схемата на правата последователност - с източник на напрежение, а в обратната и нулевата - със съответни съпротивления. Изходни данни за изчисляване на параметрите на заместващата схема на системата S са мощностите на трифазно и еднофазно к.с. ($S_{п,к}^{(3)}$, $S_{п,к}^{(1)}$) и средното номинално напрежение на шините ($U_{ср.н,S}$).

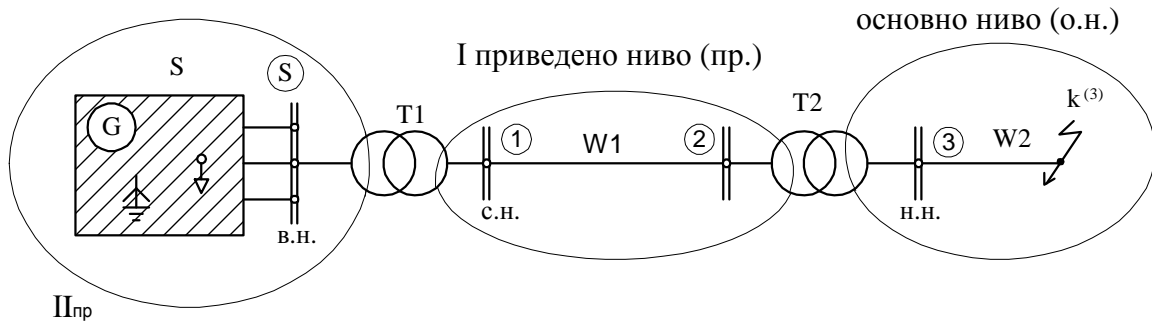
Използват се изразите

$$(50.1) \begin{cases} U_s \approx U_{ср.н,S} / \sqrt{3}; \\ X_s = U_{ср.н,S}^2 / S_{п,к}^{(3)}; \quad X_{2,S} \approx X_s; \\ X_{0,S} = \frac{3 \cdot U_{ср.н,S}^2}{S_{п,к}^{(1)}} - 2 \cdot X_s \end{cases}$$

Еквивалентна заместваща схема се нарича ел. схема само с галванични връзки т.е. с едно ниво на напрежението. При описания по-горе начин на построяване на

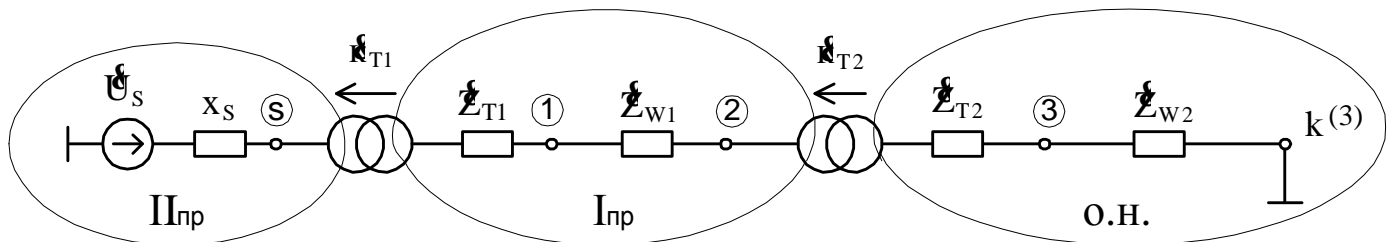
заместващите схеми за к.с. в разпределителните мрежи се получават, в зависимост от мястото на к.с., две или три нива на напрежението (ВН, СН и НН). За да се построи еквивалентната заместваща схема, трябва заместващата схема да се приведе към едно от напреженията. Прието е това напрежение да се нарича основно, а останалите приведени. Обикновено за основно се избира напрежението с мястото на к.с.

Прилага се точно и приблизително привеждане, а параметрите се изчисляват в именувани и относителни единици. За илюстрация се разглежда примерната разпределителна мрежа от фиг. 50.2 с трифазно к.с. в ниското напрежение (НН) и очертани нива на напреженията.



Фиг. 50.2.

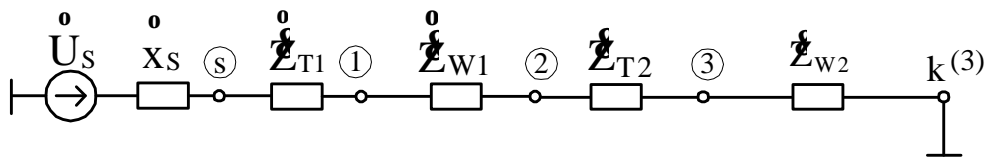
Заместващата схема на правата последователност със съответните нива на напрежението е показана на фиг. 50.3.



Фиг. 50.3.

Точното привеждане в именувани единици включва следните етапи:

- избор на основно ниво. Изборът е без ограничение. В примера за основно ниво е избрано НН;
- изчисляват се коефициентите за привежданите нива $\mathcal{K}_{i,пр}$, като произведение на коефициентите на трансформация на трансформаторите ($\mathcal{K}_{T,j}$), през които се преминава, вървейки от основното към привежданото ниво, ако $\mathcal{K}_{T,j}$ са изчислени в същата посока, в противен случай се използва $1/\mathcal{K}_{T,j}$. В примера - $\mathcal{K}_{I,пр} = \mathcal{K}_{T,2}$; $\mathcal{K}_{II,пр} = \mathcal{K}_{T,2} \cdot \mathcal{K}_{T,1}$.
- построява се еквивалентната заместваща схема и се изчисляват параметрите на привежданите нива. Конфигурацията на еквивалентната схема съответства на заместващата с тази разлика, че са премахнати идеалните трансформатори и са отразени приведените параметри. Параметрите на основното ниво не се променят (виж фиг. 50.4).



Фиг. 50.4.

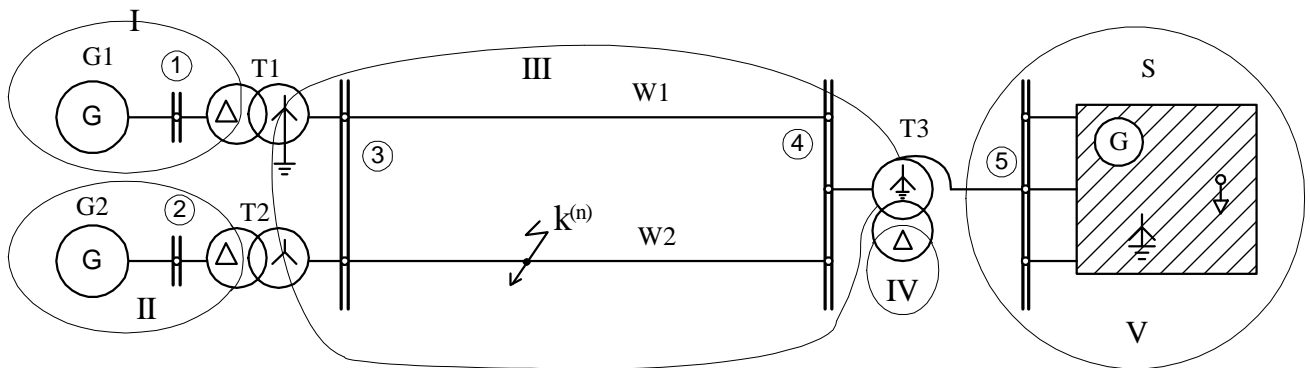
Приведените параметри се отбелязват с (0) и се изчисляват по правилата за трансформация с $K_{i,пр}$. В примера - $U_S^0 = K_{II,пр} \cdot U_S$; $X_S^0 = |K_{II,пр}|^2 \cdot X_S$;

$$Z_{T1}^0 = |K_{I,пр}|^2 \cdot Z_{T1}; \quad Z_{W1}^0 = |K_{I,пр}|^2 \cdot Z_{W1}.$$

51. Съставяне на еквивалентни заместващи схеми за изчисляване на режимите на к.с. в преносните мрежи високо напрежение и в уредбите на генераторно напрежение

Характерно за к.с. в преносните мрежи и в уредбите на генераторно напрежение е малката отдалеченост от определен брой генератори. Тези генератори в схемата на правата последователност не могат да се представят с постоянни параметри, тъй като те се променят в стадия на к.с. Затова тази схема се строи за определен момент, най-често за $t = 0$ и $t = \infty$. Електрически отдалечените от к.с. генератори се представят обобщено по начина описан във въпрос 50. За електрически отдалечени се считат генераторите отстоящи поне през две трансформации от к.с.

Индуктивното съпротивление (X) на силовите елементи в тези мрежи е по-голямо от активното им съпротивление (R). Когато заместващата схема се строи с цел да се определи ефективната стойност на периодичната съставяща (I_n), в схемата елементите се отразяват само с X , ако $X \geq 3R$. В такива случаи най-често еквивалентната схема се строи чрез приблизително привеждане в относителни единици (о.е.) (за точното привеждане вж. въпрос 50). За илюстрация се разглежда примерната ЕЕС от фиг. 51.1 с несиметрично к.с. в средата на електропровод $W2$. На същата фигура са очертани нивата на напреженията.



Фиг. 51.1.

Построяването на еквивалентните схеми чрез приблизително привеждане в о.е. включва следните етапи:

- Избор на базисна мощност S_{δ} . Изборът на S_{δ} е без ограничение. Препоръчва се от гледна точка на изчислителни удобства S_{δ} да е близка или равна на номиналната мощност на най-мощния елемент в изследваната ЕЕС и да е кратна на 10. Изборът на S_{δ} е валиден за всички нива на напрежението;
- Определят се базисните напрежения на нивото и се изчисляват базисните им токове. При приблизителното привеждане $U_{\delta,i} = U_{\text{ср.н.,i}}$ и $I_{\delta,i} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.н.,i}}}$.

(В примера има пет нива на напрежението, т.е. $i=I, \dots, V$).

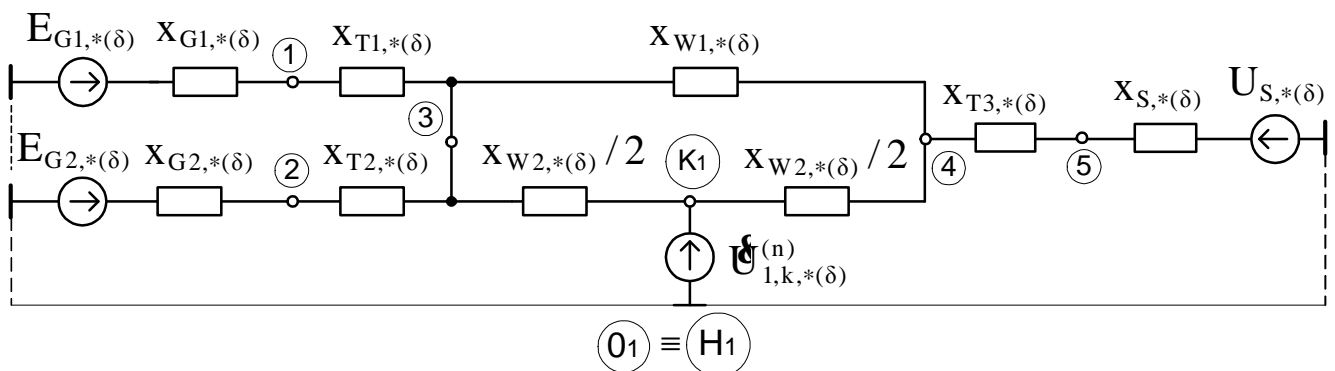
- Построяват се директно еквивалентните схеми и се изчисляват параметрите им в о.е., което се отбелязва с индекс *(б). Използват се следните изрази:

- за G - $E_{G,*(\delta)} = E_{G,*(H)}$; $X_{G,*(\delta)} = X_{G,*(H)} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{H,G}}$;

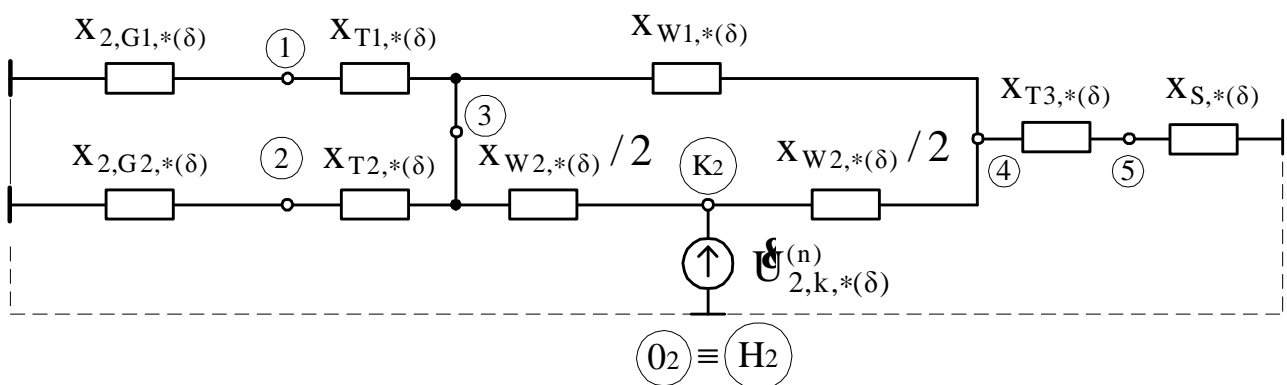
- за T - $X_{T,*(\delta)} \approx \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{H,T}}$;

- за W - $X_{W,*(\delta)} = X_W \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\text{ср.н.,W}}^2}$.

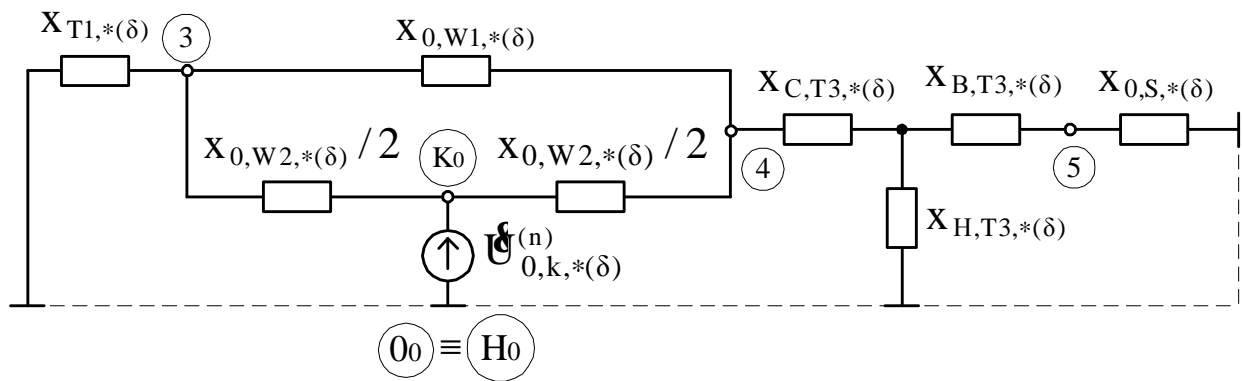
На фиг. 51.2, фиг. 51.3 и фиг. 51.4 са показани еквивалентни заместващи схеми на примерната ЕЕС, съответно за правата, обратната и нулевата последователност.



Фиг. 51.2.



Фиг. 51.3.



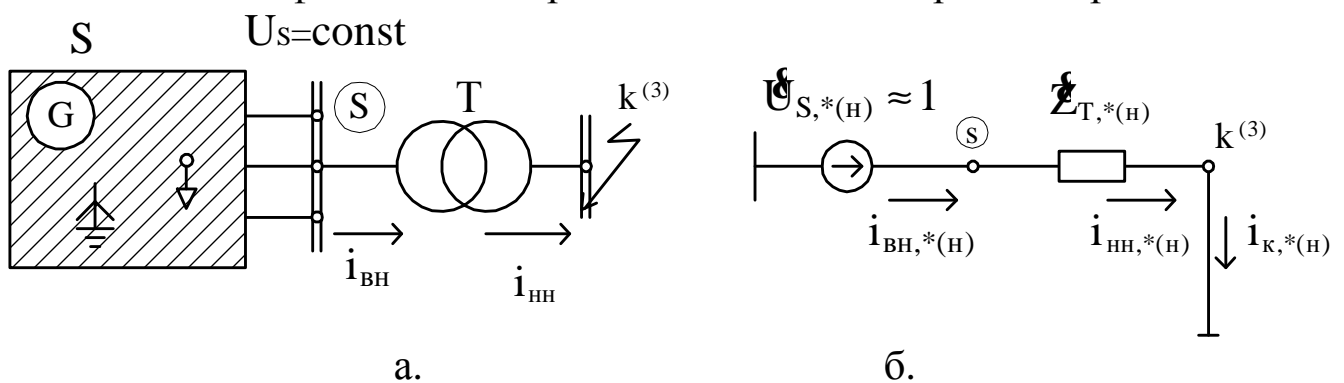
Фиг. 51.3.

Характерни точки в схемата са начало (H_i , $i=1,2,0$) и край (K_i). Началото съвпада с нулевата шина на схемата, а края с мястото на к.с. Между H_i и K_i се включват компенсиращите източници на е.д.н., $U_{i,k}^{(n)}$, с които се отразява елемента предизвикващ к.с. При метално трифазно к.с. $U_{i,k}^{(n)} = 0$ и ток тече само в схемата на правата последователност. При несиметричните к.с. $U_{i,k}^{(n)}$ са търсени величини.

За отбелязване е, че схемата на обратната последователност се отличава от схемата на правата последователност само със схемите на източниците. Схемата на нулевата последователност в общия случай се различава не само по параметри, но и по конфигурация от останалите схеми.

52. Изчисляване на характерните величини на трифазно к.с. на шините на трансформатор захранван от шини с "твърдо" напрежение. Диапазон на изменение на характерните величини за системните и мрежовите трансформатори

Разглежда се понижаващ двунамотъчен трансформатор с к.с. на ниското напрежение показан на фиг. 52.1а, захранен от шини с "твърдо" напрежение.



Фиг. 52.1.

Точното изчисляване на режима на к.с. показва, че в намотките на трансформатора възникват две свободни съставлящи на тока, затихващи по експоненти със силно различаващи се времеконстанти и начални стойности. Бавната съставляща е със значително по-малка начална стойност. Това е основание в инженерните методи на изчисление тази съставляща да не се отчита. Като се отчете, че тази съставляща е свързана с изменението на намагнитващия ток на трансформатора след-

ва, че нейното неотчитане означава в заместващата схема на трансформатора да не се отчита напречно включената проводимост Y_T (респективно Z_μ). Тогава заместващата схема добива опростения вид показан на фиг. 52.1.б. Еквивалентната схема е построена в относителни единици при номинални базисни условия, т.е. $S_\delta = S_{H,T}$; $U_{\delta,HH} = U_{ном,HH}$; $U_{\delta,BH} = U_{ном,BH}$; $I_{\delta,HH} = I_{ном,HH}$; $I_{\delta,BH} = I_{ном,BH}$. Използват се изразите -

$$(52.1) \quad \begin{cases} \left| \underline{Z}_{T,*(H)} \right| = \frac{u_k \%}{100}; & R_{T,*(H)} = \frac{\Delta P_k}{S_{H,T}}; \\ X_{T,*(H)} = \sqrt{\left| \underline{Z}_{T,*(H)} \right|^2 - R_{T,*(H)}^2}; & \underline{Z}_{T,*(H)} = R_{T,*(H)} + jX_{T,*(H)}. \end{cases}$$

Изхождайки от заместващата схема следва, че за характерните величини ($I_{п, i_{max,п}, i_y}$) на тока на к.с. се получава (вж. въпрос 49)

$$(52.2) \quad \begin{cases} I_{п,*(H)} = \frac{1}{\left| \underline{Z}_{T,*(H)} \right|} = \frac{100}{u_k \%}; & i_{max.п,*(H)} = \sqrt{2} \cdot I_{п,*(H)}; \\ i_{y,*(H)} = \sqrt{2} \cdot I_{п,*(H)} \cdot K_y, \end{cases}$$

където $K_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$, а $T_a = \frac{X_{T,*(H)}}{314 \cdot R_{T,*(H)}}$.

Ако в (52.2) се отчете, че за системните трансформатори $u_k \% = 10 \div 12\%$ и $K_y = 1,7 \div 1,9$, а за мрежовите трансформатори $u_k \% = 4 \div 6\%$ и $K_y = 1,2 \div 1,3$ следва, че се получават следните диапазони за характерните величини на тока на трифазно к.с.:

- за системни трансформатори - $I_{п,*(H)} = 8,3 \div 10$ о.е., $i_{max,п,*(H)} = 11,75 \div 14,1$ о.е., $i_{y,*(H)} \approx 22 \div 25$ о.е.;
- за мрежови трансформатори - $I_{п,*(H)} = 16,7 \div 25$ о.е., $i_{max,п,*(H)} = 23,5 \div 35,2$ о.е., $i_{y,*(H)} \approx 30 \div 46$ о.е.

Получените стойности са максималните възможни и трябва да се разглеждат като горни граници на характерните величини на тока при трифазни к.с. в ел. мрежата, захранвана от даден трансформатор.

Както се вижда от фиг. 52.1 в относителни единици токовете в изводите на трансформатора за ВН, за НН и в мястото на к.с. са числено равни. За да се определят тези токове в именуванни единици, т.е. действителните токове е достатъчно те да бъдат умножени по съответните базисни токове. В случая - по номиналните токове, т.е.:

$$(52.3) \quad \begin{cases} I_{п,BH} = I_{п,*(H)} \cdot I_{ном,BH}, \text{ kA} \\ I_{п,HH} = I_{п,*(H)} \cdot I_{ном,HH}, \text{ kA и т.н.} \end{cases}$$

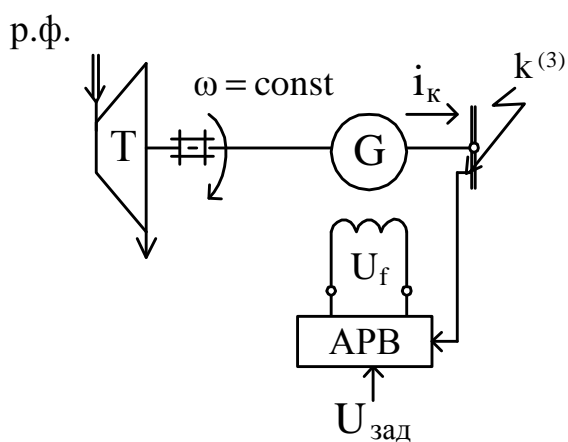
По аналогичен начин се провеждат изчисленията и при тринмотъчните трансформатори, достатъчно е в (52.1) да се използва u_k и ΔP_k за намотките участващи в к.с.

53. Изчисляване на характерните величини на тока на трифазно к.с. на шините на генератор. Диапазон на характерните величини на тока на к.с. при генератори с и без АРВ

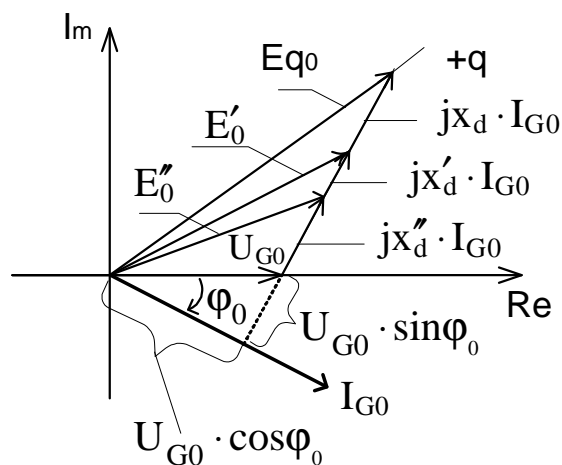
Разглежда се синхронен генератор, на изводите на който възниква метално трифазно к.с. (фиг. 53.1). Приема се, че генераторът се върти със синхронна скорост в целия стадий на к.с. Разграничават се два режима на к.с.:

- а) режим с изключена система на АРВ, т.е. без АРВ;
- б) режим с АРВ.

В първия режим $U_f = U_{f,0} = \text{const}$, а във втория $U_f = \text{var}$ от системата на АРВ за форсиране на възбуждането.



Фиг. 53.1



Фиг. 53.2

Токът във фазните изводи на генератора i_k има три съставлящи: - периодична с основна честота $i_{п}$; - периодична с удвоена честота $i_{п,2\omega}$; - аperiодична i_a . В инженерните методики на изписване на i_k , съставлящата $i_{п,2\omega}$ не се отчита (вж. въпрос 49). Най-често практически интерес представлява познаването на изменението на ефективната стойност на периодичната съставляща $I_{п}(t)$ и на ударния ток i_y . Ако генератора е без АРВ, $I_{п}(t)$ се определя с израза

$$(53.1) \quad I_{п}(t) = (I'' - I') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I' - I_{\infty}) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_{\infty}$$

където T_d'' и T_d' са съответно свръхпреходната и переходната времеконстанти на генератора. Те са каталожни данни за режима на к.с. на шините;

I'', I', I_{∞} - съответно свръхпреходен, преходен и установен ток, и се определят чрез изразите

$$(53.2) \quad I'' = \frac{E_0''}{X_d''}; \quad I' = \frac{E_0'}{X_d'}; \quad I_{\infty} = \frac{E_{q,0}}{X_d}, \quad \text{в тях } X_d'', X_d', X_d \text{ са свръхпреходен, преходен и}$$

синхронен реактанси по надлъжната ос d на генератора. Те са каталожни данни;

$E_0'', E_0', E_{q,0}$ - свръхпреходното, преходното и установеното е.д.н. на генератора за изходния установен режим преди възникване на к.с.

За определянето на тези е.д.н. се изхожда от опростената векторна диаграма на генератора (фиг. 53.2), за което са валидни съотношенията:

$$(53.3) \begin{cases} E_0'' = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d'' \cdot I_{G,0})^2} \\ E_0' = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d' \cdot I_{G,0})^2} \\ E_{q,0} = \sqrt{(U_{G,0} \cdot \cos \varphi_0)^2 + (U_{G,0} \cdot \sin \varphi_0 + X_d \cdot I_{G,0})^2} \end{cases}$$

В режима с АРВ, следствие форсирането на възбуждането се постига известно компенсирание на затихването на I_{Π} , което се отразява с добавка в (53.1), т.е.

$$(53.4) I_{\Pi, \text{АРВ}}(t) = (I'' - I') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I' - I_{\infty}) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_{\infty} + (I_{\text{пр}, \infty} - I_{\infty}) \cdot F(t),$$

където $I_{\text{пр}, \infty}$ е установения ток при пределно възбуждане, т.е.

$$(53.4a) I_{\text{пр}, \infty} = \frac{E_{q, \text{пр}}}{X_d};$$

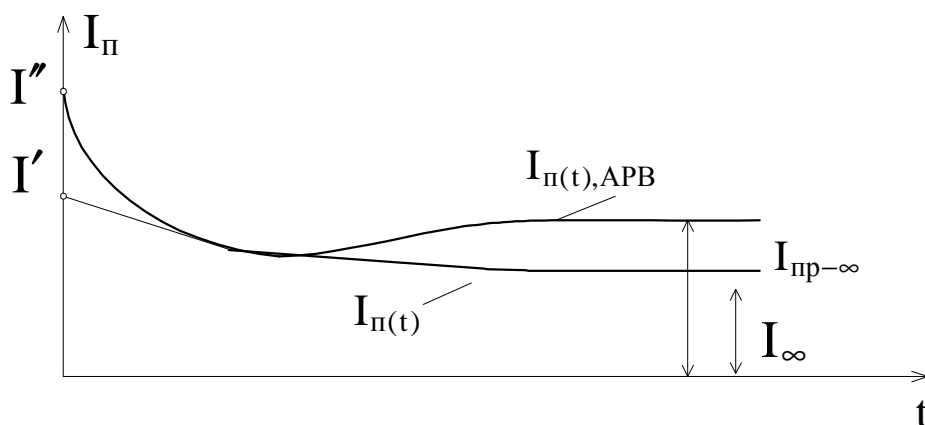
$F(t)$ - отчитаща времеконстантите на възбудителната система T_e и на генератора T_d' и се изменя във времето от 0 до 1.

За илюстрация на фиг. 53.3 е показано примерно изменение на $I_{\Pi}(t)$ при генератор с и без АРВ.

Ударният ток за случая на възникване на к.с. при изчислителното условие (вж. въпрос 49) се изчислява

$$(53.5) i_y = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot k_y; \quad k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}},$$

където T_a е времеконстанта на затихване на i_a и е каталожна данна за к.с. на шините на генератора.



Фиг. 53.3

За установяване на диапазона на ефективната стойност на периодичната съставляваща на тока при метално трифазно к.с. на шините за типове генератори в ЕЕС се разглеждат двата гранични изходни установени режима: - празен ход и номинално натоварване, и двете състояния на регулирането на възбуждането: - без и с АРВ. Реактансите X_d'' и X_d , които са необходими за изчисляването на I'' и I_{∞} зависят от типа и мощността на генератора. За турбогенераторите (ТГ)

$X_{d^{*(H)}}'' = 0,125 \div 0,25$ о.е., $X_{d^{*(H)}} = 1,65 \div 2,45$ о.е., а за хидрогенераторите (ХГ) - $X_{d^{*(H)}}'' = 0,14 \div 0,25$ о.е., $X_{d^{*(H)}} = 0,9 \div 1,4$ о.е. За режима на празен ход $I_{G,0,*^{(H)}} = 0$; $U_{G,0,*^{(H)}} = 0$; $E_{0,*^{(H)}}'' = 1$; $E_{q,0,*^{(H)}} = 1$, а за номиналното натоварване - $I_{G,0,*^{(H)}} = 1$; $U_{G,0,*^{(H)}} = 1$; $\cos\varphi_0 = \cos\varphi_H \approx 0,8$ и съобразно (53.3) - за ТГ - $E_{0,*^{(H)}}'' = 1,08 \div 1,17$ о.е.; $E_{q,0,*^{(H)}} = 2,4 \div 3,2$ о.е; за ХГ - $E_{0,*^{(H)}}'' = 1,09 \div 1,17$ о.е.; $E_{q,0,*^{(H)}} = 1,7 \div 2,2$ о.е.

За генератори без АРВ съобразно (53.2) за I'' и I_∞ се получава:

- за режима на празен ход -
 - за ТГ - $I_{*^{(H)}}'' = 8 \div 4$ о.е.; $I_{\infty,*^{(H)}} = 0,6 \div 0,41$ о.е;
 - за ХГ - $I_{*^{(H)}}'' = 7,1 \div 4$ о.е.; $I_{\infty,*^{(H)}} = 1,1 \div 0,71$ о.е;
- за режима на номинално натоварване -
 - за ТГ - $I_{*^{(H)}}'' = 8,6 \div 4,7$ о.е.; $I_{\infty,*^{(H)}} = 1,5 \div 1,3$ о.е;
 - за ХГ - $I_{*^{(H)}}'' = 7,8 \div 4,7$ о.е.; $I_{\infty,*^{(H)}} = 1,9 \div 1,6$ о.е.

Както беше изяснено АРВ не влияе на I'' , но изменя съществено I_∞ , независимо от изходния установен режим, тъй като при к.с. на шините на генератора се достига до пределното възбуждане. Съвременните АРВ осигуряват $U_{f,пр} = 2 \cdot U_{f,H}$ следователно:

- за ТГ - $E_{q,пр,*^{(H)}} = 4,8 \div 6,4$ о.е и $I_{пр,\infty} = 3 \div 2,6$ о.е.;
- за ХГ - $E_{q,пр,*^{(H)}} = 3,4 \div 4,4$ о.е и $I_{пр,\infty} = 3,8 \div 3,2$ о.е.

За отбелязване е, че при ТГ по-малките стойности на тока на к.с. се отнасят за машините с големи мощности (например с 1000 MW).

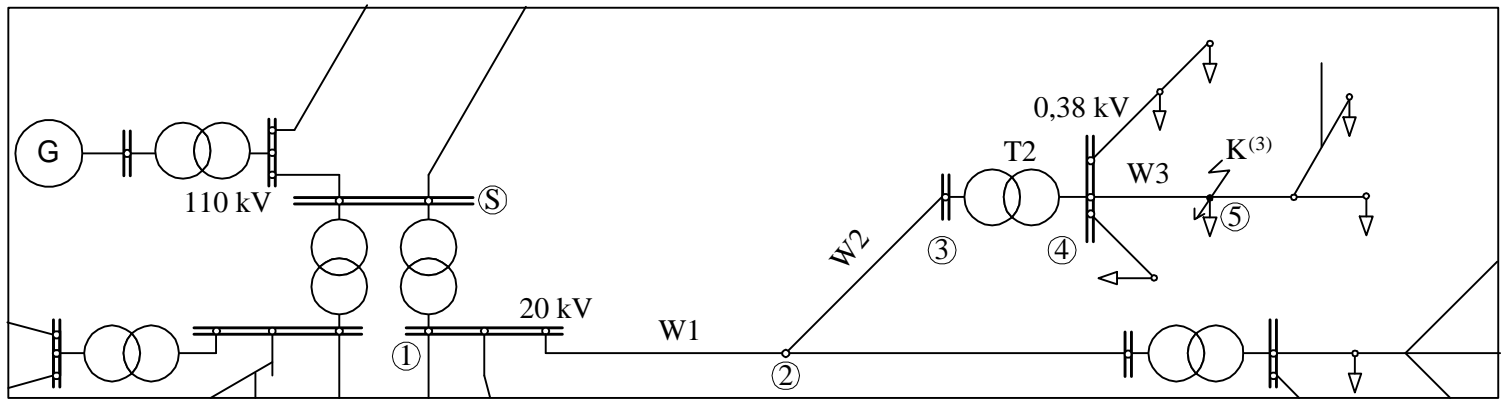
54. Изчисляване на характерните величини на тока на режима на трифазно к.с. в разпределителни мрежи. Нива на мощността на к.с.

Редът за изчисляване на режима на трифазно к.с. включва следните етапи:

1. Съставяне на изчислителната принципна схема на мрежата за конкретното място на к.с.;
2. Съставяне на еквивалентната заместваща схема на мрежата, конфигурирана в т.1;
3. Определяне на параметрите на късосъединената верига - $Z_k = R_k + jX_k$, T_a и k_y ;
4. Изчисляване на характерните величини на тока на к.с. - $I_{п}$, i_y , I_y , $i_a(t)$, $I_k(t)$.

За изясняване на реда на изчислението се разглежда примерна ЕЕС, част от принципна схема, на която е показана на фиг. 54.1.

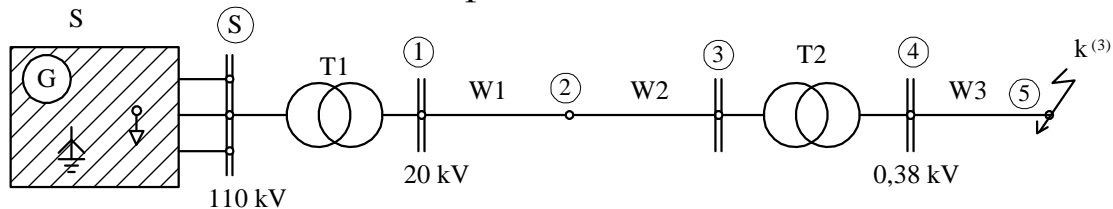
При изпълнение на т.1 от реда, т.е. при съставянето на изчислителната схема, се отчитат особеностите на разпределителните мрежи.



Фиг. 54.1

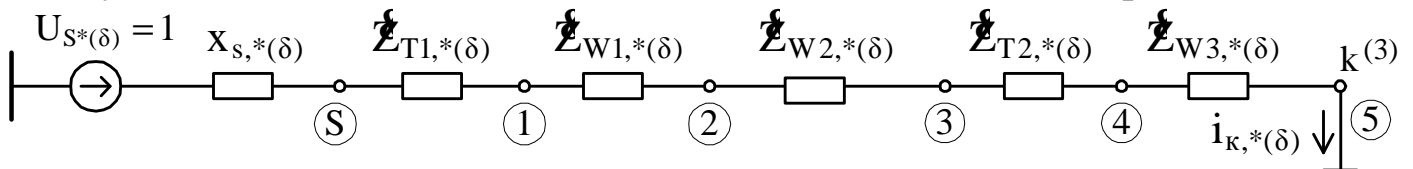
Характерно за разпределителните мрежи за средно и ниско напрежение е голямата им електрическа отдалеченост от генераторите и едностранното им захранване. Те се захранват от понижаващи трансформатори. Както беше изяснено във въпрос 50 електрическата система, захранваща тези трансформатори, се обобщава към високото им напрежение чрез източник на напрежение с постоянни параметри. В примера обобщаването трябва да се направи към шините за ВН на понижаващия трансформатор Т1, т.е. към възел S.

Друга особеност на разпределителните мрежи е, че те са отворени. Това позволява лесно да се определят силовите елементи, които ще участват в късосъединената верига, тръгвайки от мястото на к.с. и достигайки до захранващата система. В примера това са елементите W3, T2, W2, W1 и T1. Както е изяснено във въпрос 50, елементите на мрежата, които не са включени в късосъединената верига, и товарите не се отчитат при съставяне на заместващата схема. От изложеното следва, че за примера на изчислителната принципна схема при трифазно к.с. във възел 5 ще бъде от вида показан на фиг. 54.2.



Фиг. 54.2

При изпълнението на точка 2 се използва един от методите за съставяне на еквивалентна схема, изложени във въпроси 50 и 51. За примера ще приемем, че схемата е съставена в относителни единици чрез приблизително привеждане. В такъв случай еквивалентната схема ще бъде от вида показан на фиг. 54.3.



Фиг. 54.3

Очевидно е, че за съпротивлението на късосъединената верига е валиден израз

$$(54.1) \quad \dot{Z}_{k^{*(\delta)}} = R_k + jX_k = jX_{S^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{T1^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W1^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W2^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{T2^{*(\delta)}} + \dot{Z}_{W3^{*(\delta)}}$$

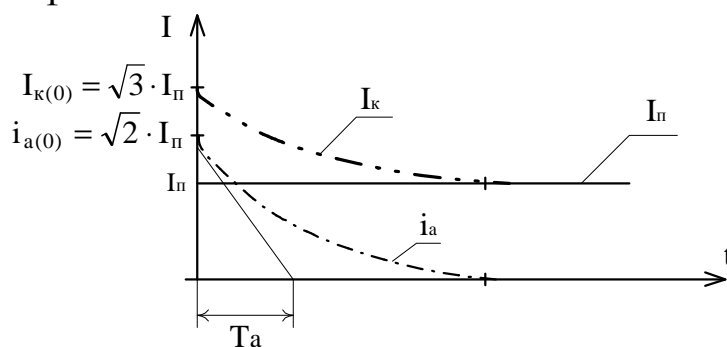
от където

$$(54.2) \quad T_a = \frac{X_k}{314 \cdot R_k} s; \quad k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}}$$

Характерните величини на тока на к.с. се изчисляват чрез изразите

$$(54.3) \quad \begin{cases} I_{\Pi^{*(6)}} = \frac{U_{S^{*(6)}}}{|Z_{k^{*(6)}}|}; & I_{\Pi} = I_{\Pi^{*(6)}} \cdot I_{\sigma,k}; \\ i_y = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi} \cdot k_y; & I_y = I_{\Pi} \cdot \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}; \\ i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_{\Pi} \cdot e^{\frac{-t}{T_a}}; & I_k(t) = I_{\Pi} \cdot \sqrt{1 + 2e^{\frac{-2t}{T_a}}}; \end{cases}$$

За илюстрация на фиг. 54.4 е показано изменението във времето на I_{Π} , i_a и I_k .



Фиг. 54.4

Максималното ниво на мощността на к.с. в мрежата се определя от номиналната мощност на захранващия я трансформатор чрез израза (вж. въпрос 52.)

$$(54.4) \quad S_{\Pi,k}^{(3)} = \frac{100}{u_k \%} \cdot S_{\text{НОМ,Т}}$$

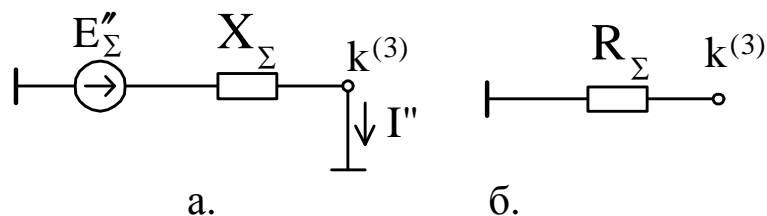
В примера от фиг. 54.2 мрежата е с две нива: - за СН - 20 kV и за НН - 0,38 kV. $S_{\Pi,k}^{(3)}$ за 0,38 kV се определя от $S_{\text{НОМ,Т2}}$, а за 20 kV - от $S_{\text{НОМ,Т1}}$.

55. Изчисляване на характерните величини на режима на трифазно к.с. в уредби за генераторно напрежение и в преносните мрежи за високо напрежение. Диапазони на мощността на к.с. за различните нива на напрежението

Най-често в практическите изчисления на режима на к.с. в мрежите за високо напрежение се определят I'' и i_y . Редът за изчисляване на тези величини на тока на трифазно к.с. включва следните етапи:

1. Съставяне на изчислителна принципна схема на ЕЕС за конкретното място на к.с.;
2. Съставяне на две еквивалентни схеми на конфигурираната ЕЕС в точка 1. Едната е схема на правата последователност с отчетени само индуктивните съпротивления на елементите (вж. въпрос 51.), а другата е пасивна схема с отчетени само активните съпротивления за правата последователност;

3. Съставените в точки 2 еквивалентни заместващи схеми, еквивалентно се преобразуват спрямо мястото на к.с. до схеми от вида показани на фиг. 55.1.;

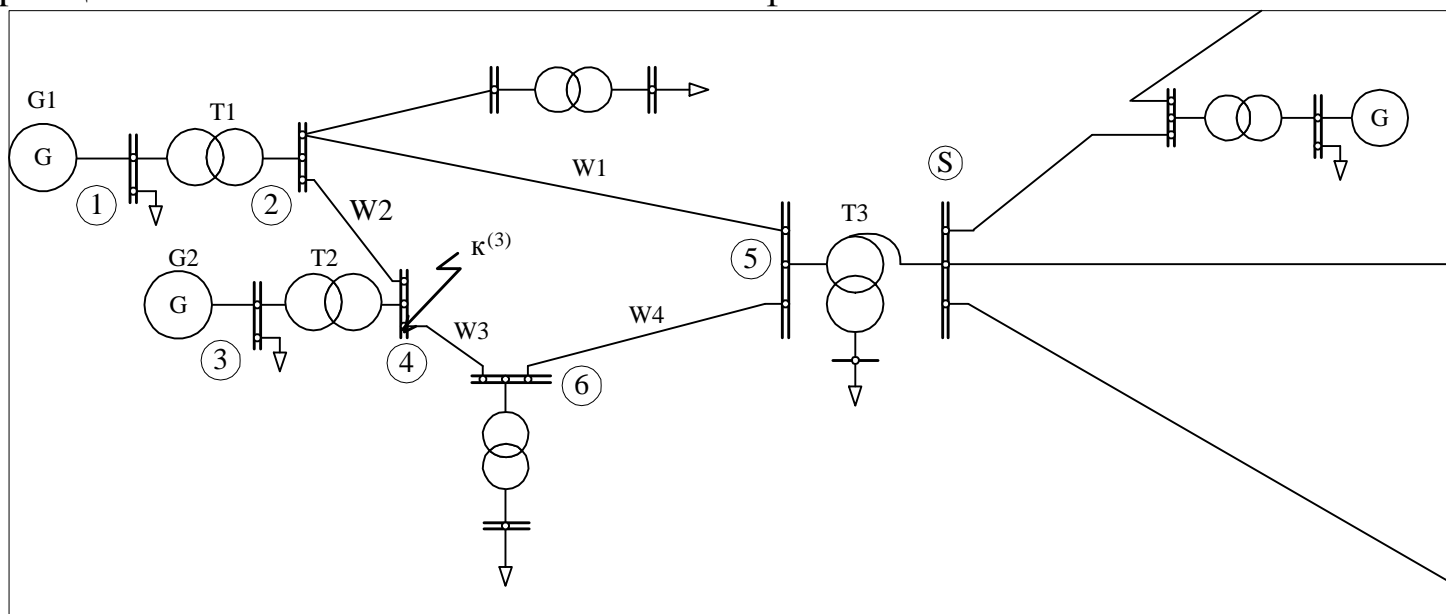


Фиг. 55.1

4. Определят се I'' и i_y чрез изразите

$$(55.1) \begin{cases} I'' = \frac{E''_{\Sigma}}{X_{\Sigma}}; i_y = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot k_y; \\ \text{където } k_y = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a,e}}}; T_{a,e} = \frac{X_{\Sigma}}{314 \cdot R_{\Sigma}} \text{ s;} \end{cases}$$

За изясняване на реда на изчислението се разглежда примерна ЕЕС, част от принципната схема на която е показана на фиг. 55.2.

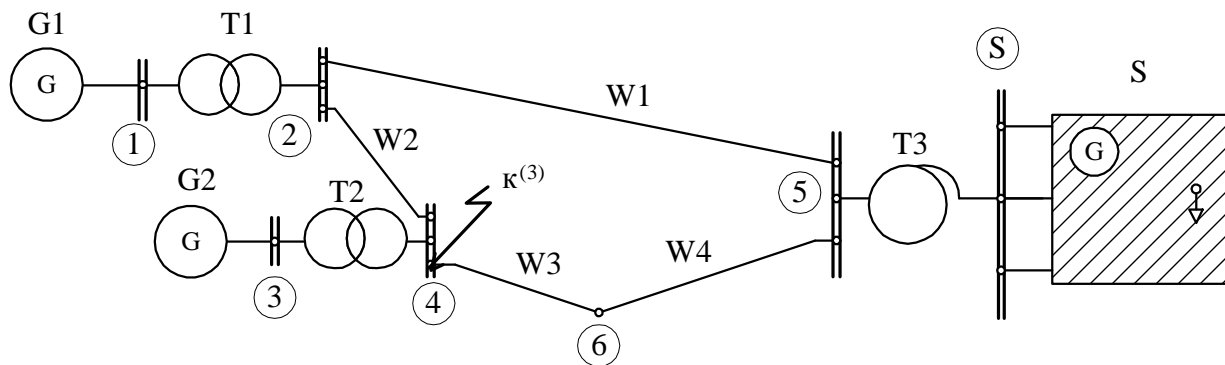


Фиг. 55.2

При съставяне на изчислителната принципна схема се отчита следното:

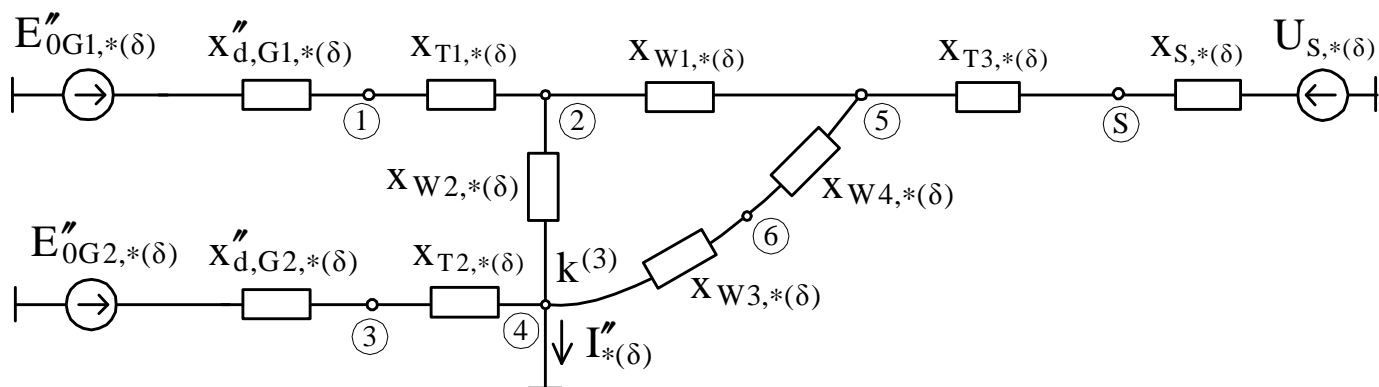
- електрически отдалечените от мястото на к.с. генератори се отчитат обобщено. На практика това са генераторите отстоящи през две трансформации от к.с. В примера това са генераторите в частта на ЕЕС свързани с шини високо напрежение на Т3. Следователно тази част от ЕЕС ще се представи обобщено с един източник на напрежение свързан във възел S (вж. въпрос 50);
- товарите и преносните елементи, които ги захранват, ако последните не са включени в късосъединена верига, не се включват в изчислителната схема.

От изложеното следва, че за примера изчислителната принципна схема на ЕЕС при к.с. във възел 4 ще бъде от вида показан на фиг. 55.3.

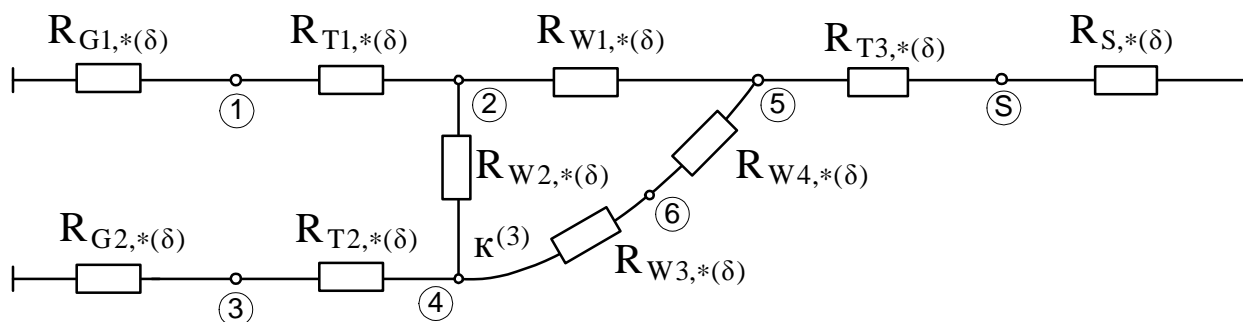


Фиг. 55.3

При изпълнение на точка 2 се използва един от методите за съставяне на еквивалентни схеми, изложени във въпроси 50 и 51. За примера ще приемем, че схемите се съставят в относителни единици. Съобразно казаното в т.2 тези схеми за примерната ЕЕС от фиг. 55.3. ще бъдат от вида (фиг. 55.4 и фиг. 55.5):



Фиг. 55.4



Фиг. 55.5

Схемите от фиг. 55.4. и фиг. 55.5. се преобразуват до схеми от вида на фиг. 55.1 чрез еквивалентни трансфигурации. Следва изчисляване чрез (55.1). Изчислените токове се привеждат в действителни размерности чрез умножаване с базисния ток на нивото с к.с. Чрез изчисления I'' се определя и мощността на к.с., т.е. - $S''_{п,k}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot I'' \cdot U_{ср.н.к.}$.

Нивата на $S''_{п,k}^{(3)}$ в мрежите за високо напрежение варират в широки граници в зависимост от местото на к.с. Максималните $S''_{п,k}^{(3)}$ за ЕЕС на РБ са от порядъка на:
 - за мрежи 110 kV - $S''_{п,k}^{(3)} \approx 3000$ MVA ; - за 220 kV - $S''_{п,k}^{(3)} \approx 3500$ MVA ; - за 400 kV - $S''_{п,k}^{(3)} \approx 4000$ MVA .

56. Изчисляване на несиметрични къси съединения в ЕЕС чрез правилото за еквивалентност на правата последователност. Комплексни заместващи схеми. Векторни диаграми на тока и напрежението в мястото на к.с.

Чрез правилото за еквивалентност на тока за правата последователност изчисляването на несиметричните к.с. се свежда до изчисляване на трифазно к.с. във фиктивна точка, електрически отдалечена от действителното място на несиметричното к.с. със съпротивление на симетриращия шунт ΔX_n . Последният зависи от еквивалентните съпротивления за обратна и нулева последователност спрямо мястото на к.с. и за различните къси съединения се определя чрез изразите

$$(56.1) \quad \begin{cases} \Delta X^{(2)} = X_{2\Sigma}; & \Delta X^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}; \\ \Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}. \end{cases}$$

От казаното следва, че тока и напрежението на правата последователност са валидни изразите

$$(56.2) \quad \begin{cases} \mathbf{I}_{A1,k}^{(n)} = \frac{E_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})}; \\ \mathbf{U}_{A1,k}^{(n)} = j\Delta X^{(n)} \cdot \mathbf{I}_{A1,k}^{(n)} \end{cases}$$

Симетричните съставлящи на тока и напрежението в мястото на к.с. за обратната и нулевата последователност са изразими чрез тези за правата, както следва:

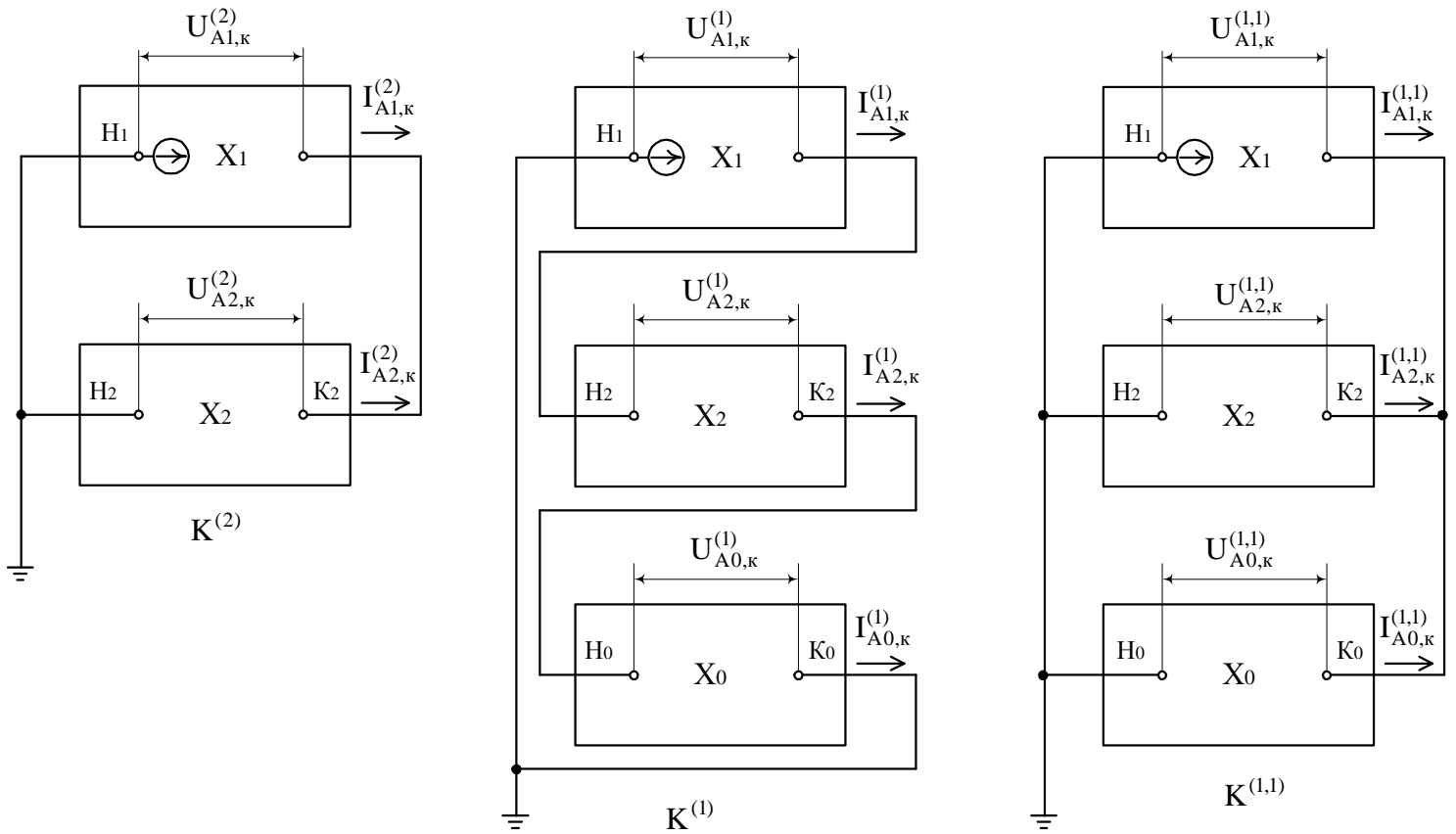
$$(56.3) \quad \begin{cases} \mathbf{I}_{A2,k}^{(2)} = -\mathbf{I}_{A1,k}^{(2)}; & \mathbf{I}_{A0,k}^{(2)} = 0; & \mathbf{U}_{A2,k}^{(2)} = \mathbf{U}_{A1,k}^{(2)}; & \mathbf{U}_{A0,k}^{(2)} = 0; \\ \mathbf{I}_{A2,k}^{(1)} = \mathbf{I}_{A1,k}^{(1)} = \mathbf{I}_{A0,k}^{(1)}; & \mathbf{U}_{A1,k}^{(1)} = -(\mathbf{U}_{A2,k}^{(1)} + \mathbf{U}_{A0,k}^{(1)}); \\ \mathbf{I}_{A2,k}^{(1,1)} = \frac{-X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \cdot \mathbf{I}_{A1,k}^{(1,1)}; & \mathbf{I}_{A0,k}^{(1,1)} = \frac{-X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \cdot \mathbf{I}_{A1,k}^{(1,1)}; & \mathbf{U}_{A1,k}^{(1,1)} = \mathbf{U}_{A2,k}^{(1,1)} = \mathbf{U}_{A0,k}^{(1,1)}; \end{cases}$$

Чрез изчисленияте симетрични съставлящи се определят и фазните величини. За големината на тока в повредените фази в мястото на к.с. е валиден обобщения израз

$$(56.4) \quad |\mathbf{I}_k^{(n)}| = m^{(n)} \cdot |\mathbf{I}_{A1,k}^{(n)}|,$$

$$\text{където } m^{(2)} = \sqrt{3}; \quad m^{(1)} = 3; \quad m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}.$$

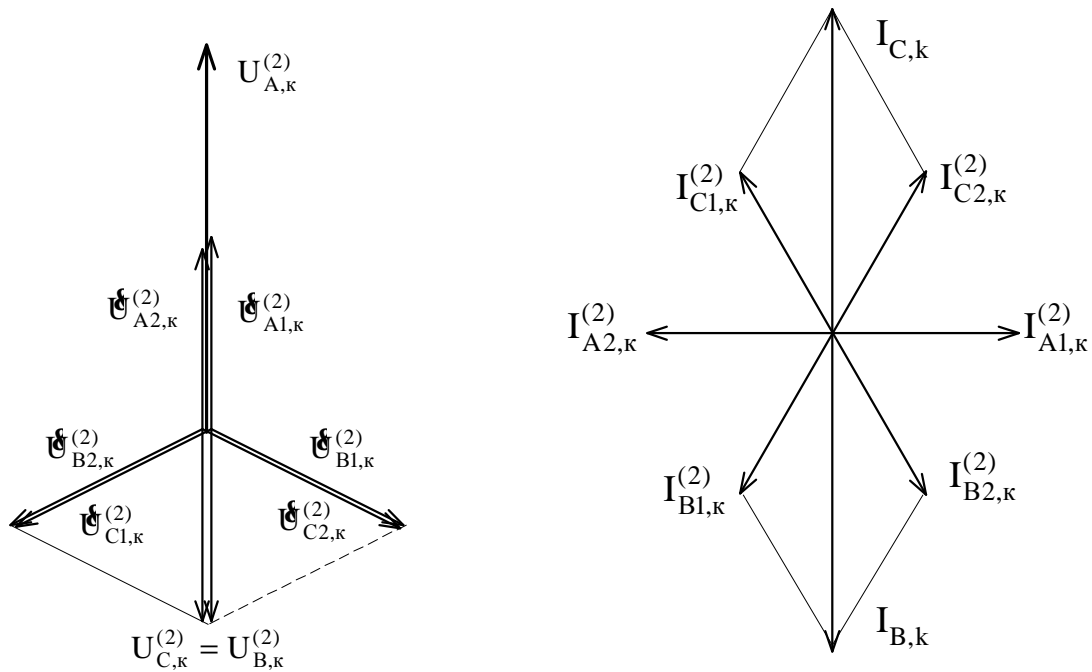
Съотношенията (55.2) и (55.3) са представими с комплексните схеми показани на фиг. 56.1.



Фиг. 56.1

Векторните диаграми на симетричните съставки и фазните величини на тока и напрежението в мястото на к.с. се представят чрез съотношенията (56.3).

На фиг. 56.2 са показани векторните диаграми за двуфазно к.с.



Фиг. 56.2

57. Съотношение между режимните параметри за режимите на различните видове къси съединения. Диапазони, регулиране на съотношенията, разпределение на симетричните съставлящи на напреженията

Практически интерес представлява отношението на ефективната стойност на периодичната съставляща на тока в повредените фази за мястото на несиметричните к.с. спрямо този на трифазното к.с., ако к.с. възникват в едно и също място на ЕЕС при еднакви изходни условия.

За големината на ефективната стойност на тока в повредените фази за мястото на к.с. е валиден израза (вж. въпрос 56)

$$(57.1) \quad |I_k^{(n)}| = m^{(n)} \cdot |I_{A1,k}^{(n)}|,$$

$$\text{където } m^{(2)} = \sqrt{3}; m^{(1)} = 3; m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}.$$

Като се отчете, че

$$(57.2) \quad |I_{A1,k}^{(n)}| = \frac{E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)}},$$

$$\text{където } \begin{cases} \Delta X^{(3)} = 0; \Delta X^{(2)} = X_{2\Sigma}; \Delta X^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}; \\ \Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}; \end{cases}$$

то за отношението на тока при несиметрични к.с. към този при трифазното к.с. се получава

$$(57.3) \quad \left\{ \begin{aligned} K_{2-3} &= \frac{|I_k^{(2)}|}{|I_k^{(3)}|} = \frac{m^{(2)}}{1 + \frac{\Delta X^{(2)}}{X_{1\Sigma}}} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{X_{2\Sigma}}{X_{1\Sigma}}}; \\ K_{1-3} &= \frac{|I_k^{(1)}|}{|I_k^{(3)}|} = \frac{m^{(1)}}{1 + \frac{\Delta X^{(1)}}{X_{1\Sigma}}} = \frac{3}{1 + \frac{X_{2\Sigma}}{X_{1\Sigma}} + \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}}}; \\ K_{1,1-3} &= \frac{|I_k^{(1,1)}|}{|I_k^{(3)}|} = \frac{m^{(1,1)}}{1 + \frac{\Delta X^{(1,1)}}{X_{1\Sigma}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}}{1 + \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \cdot \frac{1}{X_{1\Sigma}}}; \end{aligned} \right.$$

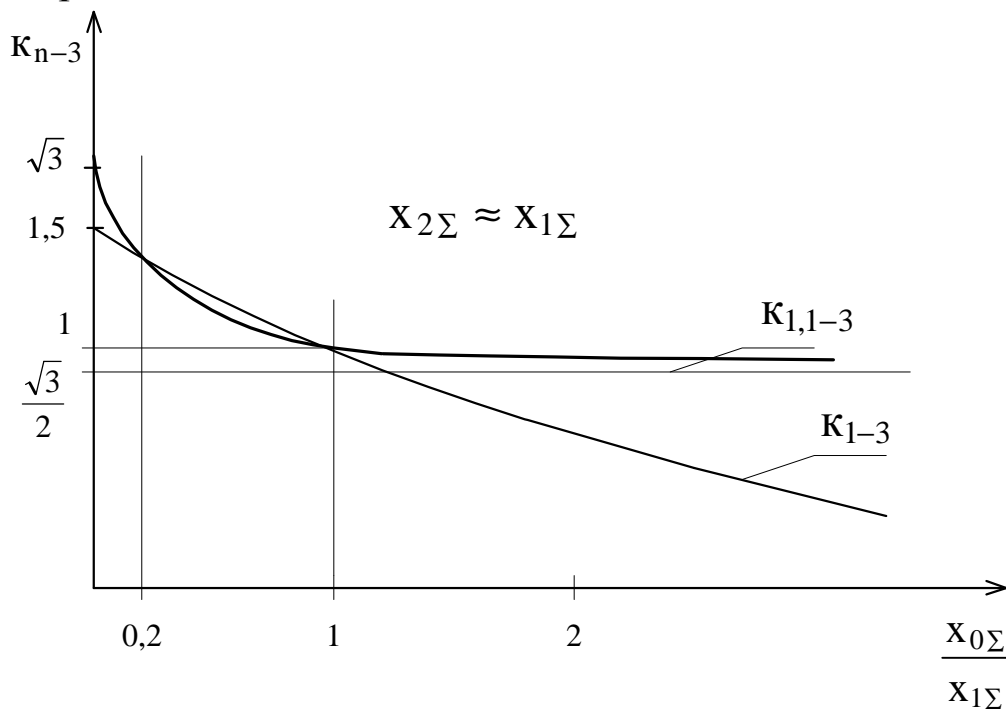
Вижда се, че K_{n-3} зависят от отношенията на сумарните съпротивления на симетричните съставлящи за мястото на к.с.

За електрически близките к.с. определящо за $X_{1\Sigma}$ е съпротивлението на генераторите, а за отдалечените к.с. - преносните елементи (трансформатори и електропроводи). Съпротивлението за права последователност на генератора X_{1G} се

изменя от X_d'' за началния момент на смущението до X_d за установения режим на к.с. Следователно за к.с. с малка електрическа отдалеченост $X_{1\Sigma}$ се изменя в широки граници в стадия на к.с. Независимо от електрическата отдалеченост $X_{2\Sigma}$ и $X_{0\Sigma}$ остават постоянни в целия стадий на к.с., при това $X_{2G} \approx X_d''$; $X_{2T} = X_{1T}$; $X_{2W} = X_{1W}$, $X_{0W} > X_{1W}$, а X_{0T} - зависи от начина на свързване на намотките и заземяването на звездните центрове. Очевидно, че отдалечените к.с. K_{n-3} практически за целия стадий на к.с.

От изложеното следва, че при двуфазно к.с. на шините на генератора, за $t=0$ $X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$ и $K_{2-3(t=0)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$; за $t = \infty$ $X_{1\Sigma} \gg X_{2\Sigma}$ и $K_{2-3(t \rightarrow \infty)} \rightarrow \sqrt{3}$. За отдалечените к.с. (к.с. в разпределителните мрежи) $X_{2\Sigma} \approx X_{1\Sigma}$ и $K_{2-3} = 0,87$.

Еднофазните к.с. възникват в мрежите с директно заземен звезден център (в мрежи за ВН и НН). В тези мрежи $X_{2\Sigma} \approx X_{1\Sigma}$. Следователно K_{1-3} зависи от $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}$. Отношението $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}$ се регулира от изменението на $X_{0\Sigma}$ чрез промяна на броя и начина на заземяването на галванично свързаните с мрежата звездни центрове на трансформаторите. При изолирани всички звездни центрове $X_{0\Sigma} = \infty$. От изложеното следва, че при $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma} \Rightarrow 0 < K_{1-3} \leq 1,5$, както това е показано на фиг. 57.1. За отбелязване е, че при $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = X_{0\Sigma}$, $K_{1-3} = 1$.



Фиг. 57.1

Ако в $K_{1,1-3}$ се положи $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$, то може да се установи, че при това условие $K_{1,1-3}$ е функция също на отношението $X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}$.

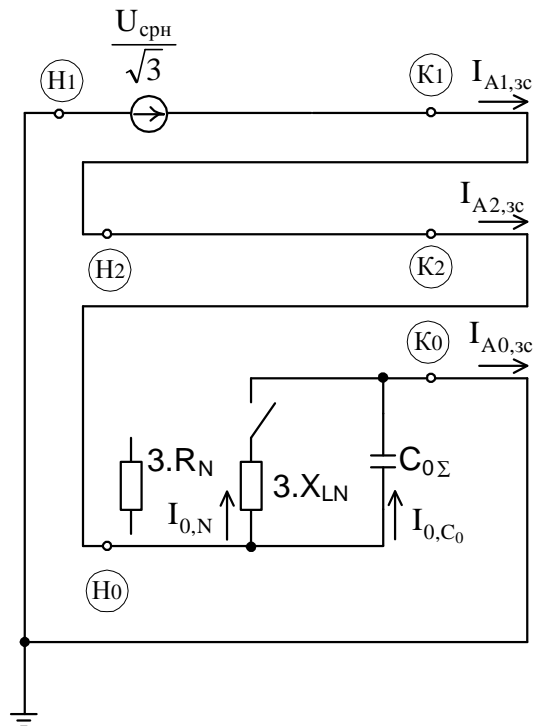
Тази зависимост е показана на фиг. 57.2. За отбелязване е, че $I_k^{(1,1)}$ е по-малък от $I_k^{(1)}$ само в диапазона $0,2 < \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} < 1$. На практика $X_{0\Sigma}$ се регулира така, че $\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} > 1$ и

$K_{n-3} < 1$, т.е. токът на трифазно к.с. в мрежите да е по-голям от този на несиметричните к.с., тъй като е прието апаратурата да се оразмерява за трифазното к.с.

Практически интерес представлява и разпределението на симетричните съставлящи на напрежението. Най-голяма е несиметрията на трифазната система напрежения в мястото на несиметричното к.с. Напреженията на обратна и нулева последователност са най-големи в мястото на к.с. С отдалечаване от к.с. тези напрежения намаляват, като напрежението на нулевата последователност не преминава през трансформатори, които не са свързани в Y_0/y_0 и не са заземени от двете страни. Напрежението за правата последователност е най-голямо при генераторите и намалява с отдалечаването от тях.

58. Изчисляване на ефективните стойности на режимните параметри на земно съединение в мрежи с различно заземяване на звездния център

Разпределителните мрежи за средно напрежение работят с неефективно заземен звезден център на източниците. Обикновено за мрежите с въздушни електропроводи се прилага резонансно заземяване през компенсирани индуктивности ($X_{L,N}$), а при мрежи с кабелни електропроводи - през резистори (R_N). При къси мрежи звезден център може да е изолиран. И при трите начина на третиране на звездния център съединението на една фаза със земя се нарича земно съединение (з.с.). При мрежи с изолиран звезден център тока на з.с. се затваря през капацитета на галванично свързаните тоководи на мрежата спрямо земя, т.е. през капацитета с нулевата последователност $C_{0\Sigma}$, а при заземяване през $X_{L,N}$ или R_N - и през заземяването на звездния център. Като се отчитат тези факти и съотношението на тези съпротивления спрямо съпротивленията на елементите на мрежата за права, обратна и нулева последователност, се намира основание за опростяване на комплексната заместваща схема на з.с. до вида показан на фиг. 58.1.



Фиг. 58.1.

Като се отчете правилото за еквивалентност на тока на правата последователност (вж. въпрос 56) следва, че големината на тока в мястото на з.с. е равен на

$$(58.1) \quad \mathbf{I}_{з.с.} = 3\mathbf{I}_{A1,з.с.} = 3\mathbf{I}_{A0,з.с.}$$

При мрежа с изолиран звезден център $\mathbf{I}_{A0,з.с.} = \mathbf{I}_{0,C_0}$ и следователно -

$$(58.2) \quad \mathbf{I}_{з.с.} = \frac{3 \cdot U_{ср.н.} / \sqrt{3}}{-jX_{C_0,\Sigma}} = j\sqrt{3} \cdot U_{ср.н.} \cdot 2\pi f_n \cdot C_{0,\Sigma} = j\sqrt{3} \cdot U_{ср.н.} \cdot 314 \cdot C_{0,\Sigma}$$

Както се вижда при направеното опростяване на комплексната схема $I_{з.с.}$ не зависи от мястото на з.с. в мрежата, а се определя от сумарния капацитет за нулева последователност на галванично свързаната мрежа.

При липса на конкретни данни за C_0 на мрежата може да се използва следната приблизителна формула

$$(58.2a) \quad \mathbf{I}_{з.с.} = j \frac{U_{ср.н.} \cdot L}{N}, \text{ A,}$$

където $U_{ср.н.}$ е в kV, L - сумарната дължина на галванично свързаната мрежа в km, а $N=350$ за въздушни мрежи и $N=10$ за кабелни мрежи.

При мрежа заземена през $X_{L,N}$ следва, че (вж. фиг. 58.1)

$$(58.3) \quad \mathbf{I}_{A_0,з.с.} = \mathbf{I}_{0,C_0} + \mathbf{I}_{L_0,N} = j \frac{U_{ср.н.}}{X_{C_0,\Sigma} \cdot \sqrt{3}} - j \frac{U_{ср.н.}}{3X_{L,N} \cdot \sqrt{3}}$$

$$(58.3a) \quad \mathbf{I}_{з.с.} = 3\mathbf{I}_{A_0,з.с.} = j\sqrt{3} \cdot U_{ср.н.} \cdot \left(\frac{1}{X_{C_0,\Sigma}} - \frac{1}{3X_{L,N}} \right)$$

Очевидно е, че ако $X_{L,N} = \frac{X_{C_0,\Sigma}}{3}$, то теоретично $I_{з.с.}=0$, т.е. налице е пълна компенсация на тока в мястото на земното съединение. Реално не настъпва пълна компенсация поради наличието на активна проводимост, която е пренебрегната в опростената схема (фиг. 58.1). На практика стремежът е да се сведе токът на земно съединение до стойност, при която дъгата изгасва самостоятелно.

При мрежа заземена през R_N следва, че (вж. 58.1)

$$(58.4) \quad \mathbf{I}_{A_0,з.с.} = \mathbf{I}_{0,C_0} + \mathbf{I}_{R_0,N} = j \frac{U_{ср.н.}}{X_{C_0,\Sigma} \cdot \sqrt{3}} + \frac{U_{ср.н.}}{3R_N \cdot \sqrt{3}}$$

$$(58.4a) \quad \mathbf{I}_{з.с.} = 3\mathbf{I}_{A_0,з.с.} = \sqrt{3} \cdot U_{ср.н.} \cdot \left(\frac{j}{X_{C_0,\Sigma}} + \frac{1}{3R_N} \right)$$

Вижда се, че при този начин на заземяване на звездния център токът в мястото на з.с. нараства с активната съставляща $3\mathbf{I}_{R_0,N}$ определена от големината на R_N . Тази съставляща протича само в електропроводи със з.с., с което се създават условия за селективно действие на релейната защита.

Обикновено з.с. възниква през електрическа дъга, което при изчисленията се отчита с активното ѝ съпротивление R_d . Токът на з.с. при отчитане на ел. дъгата

за всички разгледани начини на заземяване на звездния център се изчислява с обобщения израз -

$$(58.5) \quad \underline{I}_{з.с.} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.н.}}{\underline{Z}_{з.с.}}$$

където

$$(58.5a) \quad \begin{cases} \underline{Z}_{з.с.} = 3R_{Д} + \underline{Z}_{N} \cdot (-jX_{C_{0,\Sigma}}) / (\underline{Z}_{N} - jX_{C_{0,\Sigma}}) \\ \underline{Z}_{N} = \infty - \text{при изолиран звезден център} \\ \underline{Z}_{N} = j3X_{N} - \text{при заземяване през } X_{N} \\ \underline{Z}_{N} = 3R_{N} - \text{при заземяване през } R_{N} \end{cases}$$