

vrijeme proizvodnja ostalih vrsta, pretežno kromnih gornjih i odjevnih koža, povećana za ~75%. Udio zemalja u razvoju u proizvodnji površinskih koža dosegao je 30,8% svjetske proizvodnje.

Ukupna vrijednost godišnje svjetske proizvodnje gotovih koža procjenjuje se sa ~32 milijarde SAD dolara, a udio je govedih koža u tome ~80%. Za proizvodnju obuće troši se ~75% svjetske proizvodnje gotovih koža.

Tablica 6  
RAZVOJ PROIZVODNJE GOTOVIH KOŽA OD 1960. DO 1975.

Način prodaje koža	Jedinica mjere	Godina proizvodnje				Omjer proizvodnje 1975. i 1960. %
		1960	1965	1970	1975	
Po težini	kt	610	570	500	480	78,7
Po površini	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	560	732	850	980	175,0

Kožarska industrija SFRJ razmjerno je razvijena i ima znatnu tradiciju, osobito u Sloveniji i Hrvatskoj. Industrija kože i obuće u SFRJ stvara 2,1% društvenog proizvoda, zapošljuje 2,9% radnika od ukupnog broja zaposlenih i raspolaze sa 0,9% vrijednosti osnovnih sredstava čitave industrije. Udio je industrije kože i obuće u izvozu, međutim, viši i iznosi prosječno oko 6,5%, pri čemu izvoz nadmašuje uvoz za ~70%.

Tablica 7  
PRERADA SIROVIH KOŽA U SFRJ 1976.

Vrsta sirovih koža	Težina kt	Nabavka iz inozemstva %
Govede	86,0	34
Sitne	16,5	45
Svinjske	30,0	65

Tablica 8  
PROIZVODNJA GOTOVIH KOŽA I KRZNA U SFRJ 1976.

Vrsta proizvoda	Jedinica mjere	Količina
Đonske i tehničke kože	kt	4,5
Krupne gornje kože	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	14,3
Sitne kože	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	3,0
Krzna	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	2,6
Svinjske kože	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	6,2

Preradba sirovih koža u SFRJ 1976. godine vidi se u tabl. 7. Znanat se dio sirovih koža uvozi. Proizvodnja gotovih koža i krzna u istoj godini prikazana u tabl. 8. Udio SFRJ u ukupnoj svjetskoj proizvodnji iznosi 0,93% đonskih i tehničkih koža i 2,6% ostalih vrsta gotovih koža.

LIT.: E. Stiasny, Gerbereichemie (Chromgerbung). Theodor Steinkopff, Dresden-Leipzig 1931. — J. S. Wilson, Modern practice in leather manufacture. Reinhold Publishing Corporation, New York 1945. — W. Hausam, Die Bakteriologie in der Lederindustrie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, Stuttgart 1946. — V. Kubelka, Koželužské analyzy a zkoušení usní. Čs. společnost koželužských chemiků, Brno 1946. — V. Kubelka, Koželužství. Čs. společnost koželužských chemiků, Brno 1947. — V. Kubelka, V. Nemeš, I. Binko, Trísiliva rostlinná. Vědeckotechnické vydavatelství, Praha 1951. — L. Meunier, C. Vaney, La tannerie. Gauthier-Villars, Paris 1951—52. — I. i H. Möllering, Verfahren der Gerbereichemie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, Stuttgart 1952. — F. Stather, Haut- und Lederfehler. Julius Springer Verlag, Wien 1952. — A. H. Michailov, Химия дубящих веществ и процессов дубления. Гизлегром, Москва 1953. — B. Gložić, Kožarstvo I. Tehnička knjiga, Zagreb 1954. — Z. Bayer, Poznavanje sirovih koža. Inženjerski biro, Zagreb 1955. — M. Bergmann, W. Grassmann, Handbuch der Gerbereichemie und Lederfabrikation. Julius Springer Verlag, Wien 1931—1955. — K. H. Gustavson, The chemistry of tanning processes.

Academic Press, New York 1956. — F. Lorenz, Rauchwarenkunde. Volk und Wissenseigener Verlag, Berlin-Leipzig 1956. — A. C. Brill, Gerbereimaschinen. Eduard Roether Verlag, Darmstadt 1959. — H. V. Черно, Технология кожи и меха. Государственное научно-техническое издательство, Москва 1959. — B. Gložić, Poznavanje gotovih koža. Viša tehnološka škola, Karlovac 1961. — Kožarsko-taninski priručnik. Društvo kožara i obučara u NRH, Zagreb 1961. — L. Masner, Úprava usní. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1962. — G. Otto, Das Färben des Leders. Eduard Roether Verlag, Darmstadt 1962. — W. T. O'Flaherty-Roddy, R. M. Loller, The chemistry and technology of leather. Reinhold Publishing Corporation, New York 1956—1964. — F. Stather, Gerbereichemie und Gerbereitechnologie. Akademie Verlag, Berlin 1967. Gerbefibel. BASF, Ludwigshafen/Rhein 1955—1967. — G. Bravo, J. Trupke, 100 000 Jahre Leder. Birkhäuser Verlag, Basel-Stuttgart 1970. — И. И. Страхов, Химия и технология кожи и меха. Легкая индустрия, Москва 1970. — Gerben-Färben-Zurichten. Bayer, Leverkusen 1974. — J. Kolar, Tehnologija organskih štavinih materija i biljnosintetske štave. Viša tehnološka škola, Karlovac 1976. — И. П. Страхов, Отделка кож. Легкая индустрия, Москва 1976. — О. Г. Радченко, Оборудование и механизация кожевенных заводов. Легкая индустрия, Москва 1977.

B. Gložić

**KRATKI SPOJEVI U TROFAZNIH ELEKTRIČNIM MREŽAMA** i postrojenjima nastaju kad se ošteti ili, iz bilo kojeg razloga, nestane izolacija među dijelovima mreže ili postrojenja koji se u normalnom pogonu nalaze na različitim potencijalima. Proboj izolacije nastaje djelovanjem prenapona u mreži ili zbog starenja i mehaničkog oštećenja ili nanošenja vodljivih slojeva na izolacije. Neposredno premoštenje izolacijskog razmaka metalnim vodičem rjeđi je uzrok kvara u visokonaponskim mrežama.

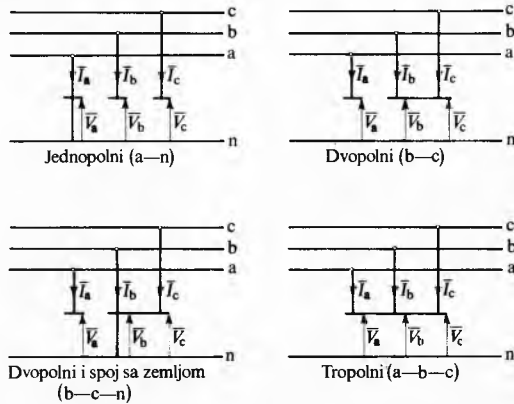
Za vrijeme kratkog spoja kroz dijelove elektroenergetskog sustava teku znatno veće struje nego u normalnom pogonu. Zbog toga se povećavaju toplinska i mehanička naprezanja, pa je prilikom projektiranja postrojenja i mreža takvom izuzetnom pogonskom stanju potrebno posvetiti osobitu pažnju. Osim neposrednih štetnih posljedica, (oštećenje dijelova postrojenja i mreže), kratki spoj obično uzrokuje prekid opskrbe energijom u manjem ili većem području oko mjesta kvara, što ovisi o brzini i selektivnosti zaštite te o stabilnosti elektroenergetskog sustava u promijenjenom stanju. Velike struje štetno utječu i na informacijske prijenosne sustave. Za vrijeme kratkih spojeva sa zemljom u okolišu uzemljivača, kroz koje protječu struje, pojavljuju se na površini zemlje razlike potencijala. One mogu imati tolike vrijednosti da su opasne za živa bića. Za izbor i dimenzioniranje mrežnih zaštitnih uređaja potrebno je poznavati i najmanje vrijednosti struja kratkog spoja.

Kvarovi u mreži mogu biti poprečni i uzdužni. Poprečni kvarovi nastaju spojem između vodiča različitih faza i faznih vodiča sa zemljom, dok su prekidi faznih vodiča uzdužni kvarovi. S obzirom na broj istodobnih kvarova na različitim mjestima u mreži razlikuju se jednostruki i višestruki kratki spojevi.

Vrste kratkih spojeva razlikuju se prema broju međusobno kratko spojenih faza i prema tome da li postoji spoj sa zemljom. Spoj jedne faze sa zemljom najčešći je kvar. Takav kvar naziva se dozemnim spojem ako je zvjezdište transformatora izolirano ili ako je mreža kompenzirana na dozemni spoj pomoću prigušnice u zvjezdištu transformatora. Dozemni spoj ne smatra se kratkim spojem, jer mreža može neko vrijeme ostati u pogonu i pored postojanja spoja jedne faze sa zemljom. Ako je, međutim, zvjezdište neposredno uzemljeno ili uzemljeno preko impedancije male vrijednosti, spoj jedne faze sa zemljom naziva se jednopolnim kratkim spojem, jer tada kroz mrežu protječu povećane struje, pa je potrebno što prije isključiti dio mreže u kojem se pojavio takav kvar. Osim jednopolnog kratkog spoja, u mrežama može nastati dvopolni kratki spoj (spoj dviju faza), dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom i trolpolni kratki spoj (spoj svih triju faza; sl. 1).

Struje i naponi za vrijeme trajanja kratkog spoja mogu se odrediti mjerenjem u stvarnom sustavu, mjerenjem na fizičkom modelu ili računski pomoću matematičkog modela sustava. S obzirom na točnost koja se traži, a zbog pojednostavnjenja fizičkog ili matematičkog modela sustava, za različite naponske

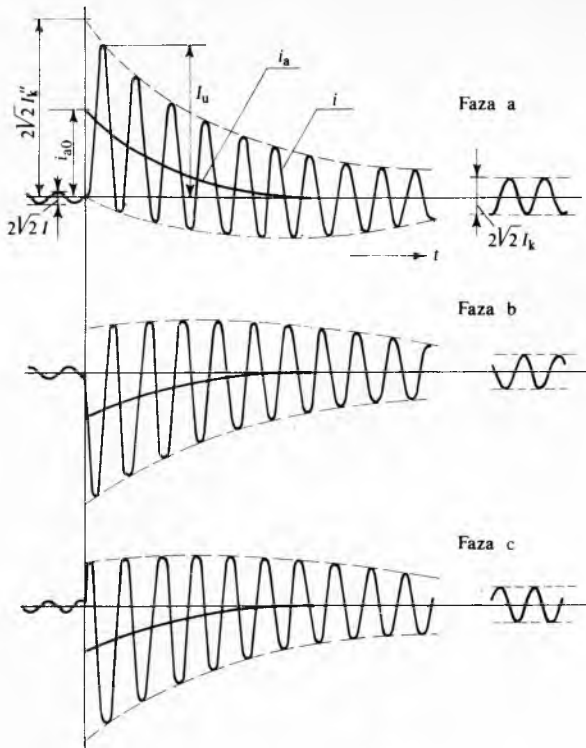
razine dozvoljavaju se određena zanemarenja. Za vodove napona do 1 kV zanemaruje se reaktancija, a za elemente sustava napona višeg od 10 kV zanemaruje se rezistancija. Često se, osim toga, pretpostavlja da elektroenergetski sustav nije bio opterećen prije nastanka kratkog spoja.



Sl. 1. Najčešći kratki spojevi u mreži. a, b, c fazni vodiči, n zemlja,  $I$  fazori poprečnih struja,  $V$  fazori faznih napona na mjestu kvara

**Vremenske promjene struja kratkog spoja.** Tropolni kratki spoj podjednako opterećuje sve tri faze, pa se on naziva simetričnim. Njegov proračun i analiza su najjednostavniji. Nakon nastanka kratkog spoja kroz vodiče pojedinih faza proteći će dodatne struje (sl. 2). Te struje će nastojati održati ulančenje magnetskih tokova namotima i vodovima statorskog strujnog kruga generatora koje je zatečeno u trenutku pojave kratkog spoja. U općenitom slučaju promjene su struje u sve tri faze neposredno nakon nastanka kratkog spoja asimetrične prema vremenskoj osi (sl. 2). To pokazuje da postoje istosmjerne komponente struje  $i_a$  u tom vremenu.

Istosmjerne komponente struje podržavat će ulančene magnetske tokove onakve kakvi su postojali u trenutku nastanka



Sl. 2. Struje troleznog kratkog spoja.  $I$ ,  $I''_k$ ,  $I_k$  efektivne vrijednosti struje opterećenja, početne i trajne izmjenične komponente struje kratkog spoja,  $I_u$  udarna struja kratkog spoja,  $i_{a0}$  početna vrijednost istosmjerne komponente struje,  $i_a$  istosmjerna komponenta struje,  $i$  ukupna struja

kratkog spoja. Budući da one nisu podržavane stalnim naponom, a zbog postojanja rezistancija u strujnom krugu, smanjivat će se od početne vrijednosti  $i_{a0}$  po eksponencijalnom zakonu:

$$i_a = i_{a0} \exp\left(\frac{-t}{T_{am}}\right). \quad (1)$$

$T_{am}$  je vremenska konstanta istosmjerne struje

$$T_{am} = \frac{X'_d + X_{dm}}{\omega(R_g + R_m)}, \quad (2)$$

gdje je  $X'_d$  početna reaktancija turbogeneratora (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 207),  $X_{dm}$  direktna reaktancija mreže, odnosno voda, između generatora i mjesta kratkog spoja (v. *Električni vodovi*, TE 4, str. 226),  $R_g$  rezistancija statorskog napona generatora,  $R_m$  rezistancija mreže, a  $\omega$  kružna sinhrona frekvencija izmjeničnih veličina.

Amplitude izmjenične komponente struje brzo se u početku smanjuju, da bi se kasnije sve sporije približavale ustaljenoj konačnoj vrijednosti. Te komponente struja statorskih namota tvorit će okretno magnetsko polje koje će se protiviti promjenama ulančenih tokova zbog okretanja uzbuđenog toka. Izmjenične struje, dakle, fazno su pomaknute za  $120^\circ$ . Budući da se u trenutku nastanka kratkog spoja ne može trenutno promijeniti struja, istosmjerne komponente struje u pojedinim fazama bit će jednake promjenama trenutnih vrijednosti izmjeničnih struja, ali suprotnog smjera. Promjena trenutne vrijednosti izmjenične komponente ovisi o položaju uzbuđenog toka prema namotu svake od faza u momentu nastanka kratkog spoja. Amplitudnu vrijednost imat će struja u fazi kojoj se u trenutku nastanka kratkog spoja os namota podudara s osi uzbuđenog toka. Kroz namot te faze proteći će i maksimalna vrijednost istosmjerne komponente. Ako se zanemari struja opterećenja, amplituda izmjenične komponente struje u trenutku nastanka kratkog spoja iznosi:

$$\sqrt{2}I''_k = E''[R_m^2 + (X'_d + X_{dm})^2]^{-1/2}. \quad (3)$$

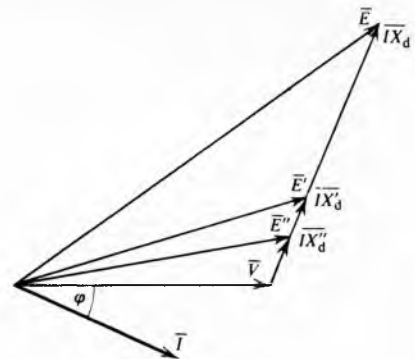
$I''_k$  naziva se efektivnom vrijednošću početne izmjenične struje kratkog spoja, a  $E''$  početnim pokretačkim naponom (sl. 3). Kad generatori ne bi imali prigušne namote, amplituda bi imala vrijednost

$$\sqrt{2}I'_k = E'[R_m^2 + (X'_d + X_{dm})^2]^{-1/2}. \quad (4)$$

$I'_k$  naziva se efektivnom vrijednošću prijelazne izmjenične struje kratkog spoja,  $E'$  prijelaznim pokretačkim naponom, a  $X'_d$  prijelaznom reaktancijom generatora. Pretpostavi li se da naponski regulator ne mijenja za vrijeme prijelazne pojave uzbuđeni magnetski tok, amplituda je trajne struje kratkog spoja

$$\sqrt{2}I_k = E[R_m^2 + (X_d + X_{dm})^2]^{-1/2}, \quad (5)$$

gdje je  $I_k$  efektivna vrijednost trajne struje kratkog spoja,  $E$  trajni pokretački napon, a  $X_d$  sinhrona reaktancija generatora.



Sl. 3. Pojednostavnjeni fazorski dijagram turbogeneratora.  $V$  fazni napon na stezaljkama generatora,  $I$  struja opterećenja,  $\varphi$  kut faznog pomaka struje prema naponu,  $E''$ ,  $E'$ ,  $E$  pokretački naponi: početni, prijelazni i trajni,  $X'_d$ ,  $X'_d$ ,  $X_d$  početna, prijelazna i sinhrona reaktancija

Da bi se sačuvalo ulančenje magnetskog toka rotorskim namotima koje je vladalo u trenutku nastanka kratkog spoja, kao reakcija na okretno magnetsko polje statora pojaviti će se dodatne istosmjerne struje u namotima rotora. Iz istih razloga kao istosmjerne komponente statorskih struja, one će postepeno slabiti i dopuštati prolaz dijela okretnog toka statora kroz željezo rotora. Zbog smanjenog magnetskog otpora statorskog toka smanjivat će se izmjenične komponente struja. Također će se tokom vremena zatvarati veći dio uzbudnog toka kroz željezo statora i povećavati pokretački napon. Zbog odnosa koji vladaju u prigušnim namotima brže će iščezavati njihove istosmjerne struje nego dodatna struja u uzbudnom namotu. Zbog toga se amplitude izmjenične komponente u početku brže mijenjaju. Kad bi dodatna struja u uzbudnom namotu ostala nepromijenjena, razlike amplituda mijenjale bi se prema relaciji

$$\sqrt{2} \Delta I'' = \sqrt{2} (I''_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right), \quad (6)$$

gdje je vremenska konstanta određena izrazom

$$T'_{dm} = T'_{d0} \frac{X'_d + Z_{dm}}{X'_d + Z_{dm}}, \quad (7)$$

u kojem je  $T'_{d0}$  početna vremenska konstanta praznog hoda generatora, a  $Z_{dm}$  direktna impedancija mreže između generatora i mjesta kratkog spoja. Kad je generator bez prigušnih namota, razlika amplituda smanjuje se prema relaciji:

$$\sqrt{2} \Delta I' = \sqrt{2} (I'_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right), \quad (8)$$

u kojoj je vremenska konstanta

$$T'_{dm} = T'_{d0} \frac{X'_d + Z_{dm}}{X'_d + Z_{dm}}, \quad (9)$$

gdje je  $T'_{d0}$  prijelazna vremenska konstanta praznog hoda generatora.

Ako se pretpostavi da se izmjenična komponenta vremenski mijenja po zakonu kosinusa, ovisnost ukupne struje kratkog

spoja u fazi s maksimalnom istosmjernom komponentom o vremenu daje se prikazati, za generatore s prigušnim namotima, kao zbroj komponentnih struja:

$$i = -\sqrt{2} \left\{ (I''_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right) + (I'_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right) + I_k \right\} \cos \omega t - I'_k \exp\left(\frac{-t}{T_{am}}\right) \quad (10)$$

Efektivne vrijednosti struja  $I''_k$ ,  $I'_k$  i  $I_k$ , te vremenske konstante  $T'_{dm}$ ,  $T_{dm}$  i  $T_{am}$  ovise o vrsti kratkog spoja.

**Karakteristične vrijednosti struja kratkog spoja.** Za dimenzioniranje elemenata postrojenja dovoljno je poznavati samo karakteristične vrijednosti struje kratkog spoja (tabl. 1).

Udarna struja  $I_u$  (sl. 2) maksimalna je trenutna vrijednost struje kratkog spoja.

Rasklopna simetrična struja  $I_{rs}$  definirana je kao efektivna vrijednost izmjenične komponente struje kratkog spoja u trenutku  $t$  otvaranja prekidača:

$$I_{rs} = (I''_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right) + (I'_k - I_k) \exp\left(\frac{-t}{T'_{dm}}\right) + I_k, \quad (11)$$

a za rasklopnu asimetričnu struju  $I_{ra}$  uzima se u obzir i istosmjerna struja koja teče u istom trenutku:

$$I_{ra} = \left\{ I_{rs}^2 + 2 \left[ I'_k \exp\left(\frac{-t}{T_{am}}\right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

Struja kratkog spoja mjerodavna za ugrijavanje  $I_t$  efektivna je vrijednost struje od trenutka nastanka pa do trenutka prekida struje kratkog spoja:

$$I_t = \left( \frac{1}{t} \int_0^t i^2 dt \right)^{1/2} \quad (13)$$

Također je i efektivna vrijednost trajne struje kratkog spoja  $I_k$  jedna od karakterističnih veličina. Određivanje tih vrijednosti svodi se u praktičnim proračunima na određivanje efektivne vrijednosti početne izmjenične struje kratkog spoja i na njeno množenje s faktorom ovisnim o traženoj vrijednosti i vrsti kratkog spoja.

**Proračun izmjenične komponente.** Polazeći od jednostavnog modela trofazne mreže (sl. 4), mogu se odrediti odnosi koji vladaju između pokretačkih napona  $\bar{E}_a$ ,  $\bar{E}_b$  i  $\bar{E}_c$ , poprečnih izmjeničnih struja kratkog spoja  $\bar{I}_a$ ,  $\bar{I}_b$  i  $\bar{I}_c$  i napona na mjestu kvara  $\bar{V}_a$ ,  $\bar{V}_b$  i  $\bar{V}_c$ .  $\bar{Z}_{aa}$ ,  $\bar{Z}_{bb}$ ,  $\bar{Z}_{cc}$  i  $\bar{Z}_{nn}$  vlastite su impedancije pojedinih faza, odnosno povratnog voda. Ako se nadalje impedancije između pojedinih faza označe sa  $\bar{Z}_{ab}$ ,  $\bar{Z}_{ac}$ ,  $\bar{Z}_{ba}$ ,  $\bar{Z}_{bc}$ ,  $\bar{Z}_{ca}$  i  $\bar{Z}_{cb}$ , a između faznih vodiča i povratnog voda sa  $\bar{Z}_{an}$ ,  $\bar{Z}_{bn}$  i  $\bar{Z}_{cn}$  i primijene Kirchhoffovi zakoni na model mreže, dobiva se matična jednadžba:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{nn} - 2\bar{Z}_{an} & \bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{bn} - \bar{Z}_{an} \\ \bar{Z}_{ba} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{an} - \bar{Z}_{bn} & \bar{Z}_{bb} + \bar{Z}_{nn} - 2\bar{Z}_{bn} \\ \bar{Z}_{ca} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{an} - \bar{Z}_{cn} & \bar{Z}_{cb} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{bn} - \bar{Z}_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

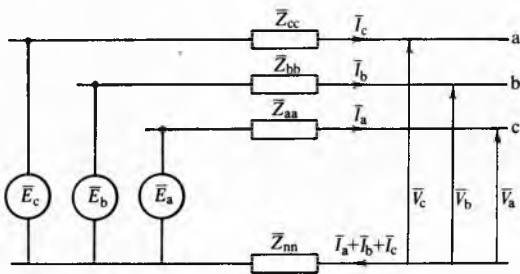
U elektroenergetskim mrežama vlastite impedancije pojedinih faza približno su jednake. Također se može uzeti da su jednake impedancije između faznih vodiča i povratnog voda. Zbog toga će i svi dijagonalni elementi matrice impedancija biti jednaki.

Tablica 1  
STRUJE KRATKOG SPOJA MJERODAVNE ZA IZBOR ELEMENATA TROFAZNE MREŽE

Struja mjerodavna za:	Vrsta kratkog spoja	Struja kratkog spoja					Mjerodavna je:	Mreža
		$I_u$	$I_r$	$I_t$	$I'_k$	$I_k$		
ugrijavanje	a-b-c a-n			///	///		najveća struja kratkog spoja	VN NN VN NN
mehaničko naprezanje	a-b-c	///						VN NN
uklopnu snagu	a-b-c a-n	///						VN NN NN
rasklopnu snagu	a-b-c a-n	///						VN NN NN
napon uzemlji-vača, napon dodira	a-n				///			VN
induktivne utjecaje	a--n				///			VN
proradu releja	a-b-c					///	najmanja struja kratkog spoja	VN NN
proradu zaštitnih uređaja pri zaštiti sa zaštitnim vodičem, pri nulovanju	b-c a-n					///		NN NN

NN niskonaponske mreže (do 1 kV), VN visokonaponske mreže (više od 1 kV)

Međusobne impedancije vodiča pojedinih faza međusobno su jednake dok u generatoru, zbog postojanja strujnih krugova na rotoru između faza, postoji ciklička simetrija. Zbog toga se za ukupne impedancije među fazama može uzeti da su samo ciklički simetrične:  $\bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{bc} = \bar{Z}_{ca}$ , odnosno  $\bar{Z}_{ac} = \bar{Z}_{cb} = \bar{Z}_{ba}$ .



Sl. 4. Model jednostavne trofazne mreže

Uz navedene pretpostavke matricna jednadžba (14) dobiva jednostavniji oblik

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Z} & \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 \\ \bar{Z}_2 & \bar{Z} & \bar{Z}_1 \\ \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 & \bar{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix}, \quad (15)$$

gdje su

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{nn} - 2\bar{Z}_{an} \quad (16a)$$

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{bn} - \bar{Z}_{an} \quad (16b)$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{ac} + \bar{Z}_{nn} - \bar{Z}_{cn} - \bar{Z}_{an}. \quad (16c)$$

U sustavu sa simetričnim pokretačkim naponima i ciklički simetričnom matricom impedancija, u kojem je opterećenje simetrično, teku simetrične struje. Zbog toga je dovoljno, kad se u takvu sustavu određuju naponi i struje, promatrati samo jednu fazu. Za nju vrijedi da je

$$\bar{E}_a = \bar{V}_a + \bar{Z}_d \bar{I}_d, \quad (17)$$

gdje je

$$\bar{Z}_d = \bar{Z} + a^2 \bar{Z}_1 + a \bar{Z}_2. \quad (18)$$

$\bar{Z}_d$  je impedancija direktnog sustava, a

$$a = \exp\left(j\frac{2\pi}{3}\right) \quad (19)$$

jedinični fazor. Množenjem nekog fazora jediničnim fazorom  $a$  zakreće se fazor u kompleksnoj ravnini za  $120^\circ$  u pozitivnom smjeru. Struje i naponi u fazi b dobiju se zakretanjem onih iz faze a za  $240^\circ$  u pozitivnom smjeru, odnosno množenjem sa  $a^2$ , a u fazi c zakretanjem za  $120^\circ$ , odnosno množenjem sa  $a$ .

Za određivanje napona i struja u sustavu koji je nesimetrično opterećen potrebno je uz zadane karakteristike opterećenja riješiti matricnu jednadžbu (15). Da bi se pojednostavio računski postupak i dobilo na preglednosti, pretvara se matricna jednadžba, odnosno sustav od tri jednadžbe od kojih svaka ima tri nepoznanice u sustav od tri jednadžbe od kojih svaka ima po jednu nepoznanicu. Ta zamjena može se provesti pomoću matrice transformacije  $\underline{A}$ , tako da je

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_a \\ \bar{E}_b \\ \bar{E}_c \end{bmatrix} = \underline{A} \begin{bmatrix} \bar{E}_d \\ \bar{E}_i \\ \bar{E}_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \underline{A} \begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \underline{A} \begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Indeksima d, i, 0 označene su nove promjenljive veličine. Uvrštavanjem izraza (20), (21) i (22) u (15) izlazi da je

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_d \\ \bar{E}_i \\ \bar{E}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} + \underline{A}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z} & \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 \\ \bar{Z}_2 & \bar{Z} & \bar{Z}_1 \\ \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 & \bar{Z} \end{bmatrix} \underline{A} \begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Matrica transformacije

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

kojoj je inverzna matrica

$$\underline{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ima svojstvo da ciklički simetričnu matricu iz izraza (23), nakon naznačenih operacija, pretvori u dijagonalnu, odnosno da transformira sustav jednadžbi (15) u sustav od tri jednadžbe od kojih svaka ima po jednu nepoznanicu:

$$\underline{A}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z} & \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 \\ \bar{Z}_2 & \bar{Z} & \bar{Z}_1 \\ \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 & \bar{Z} \end{bmatrix} \underline{A} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_0 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Izrazom (18) određena je impedancija  $\bar{Z}_d$ . Impedancija

$$\bar{Z}_i = \bar{Z} + a \bar{Z}_1 + a^2 \bar{Z}_2 \quad (27)$$

naziva se impedancijom inverznog sustava, a impedancija

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z} + \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 \quad (28)$$

impedancijom nultog sustava.

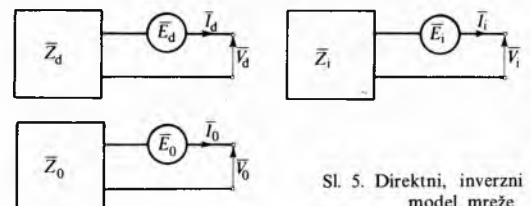
Uvažavajući relaciju (26), izraz (23) poprima novi oblik

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_d \\ \bar{E}_i \\ \bar{E}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Z}_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Dakle, ako u nekoj mreži postoji barem ciklička simetrija u fazama, mreža dobivena transformacijom sastoji se iz tri neulančene mreže.

Transformacija napona i struja pomoću matrice  $\underline{A}$  naziva se transformacijom u simetrične komponente, jer se stvarne veličine prema (20), (21), (22) i (24) nadomještaju zbrojem simetričnog trofaznog sustava normalnog slijeda faza (direktni sustav, označen indeksom d), simetričnog trofaznog sustava inverznog slijeda faza (inverzni sustav, označen indeksom i), te istofaznog sustava (nulti sustav, označen indeksom 0).

Nesimetrično opterećena mreža na sl. 4, uz navedene pretpostavke o impedancijama, može se nadomjestiti sa tri trofazne simetrično opterećene mreže, odnosno, jer se radi o simetričnim mrežama, sa tri jednofazne mreže (sl. 5).



Sl. 5. Direktni, inverzni i nulti model mreže

Trofazni generatori u elektroenergetskom sustavu proizvode samo direktni sustav napona, pa relacija (29) dobiva konačni oblik

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Z}_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Stvarni elektroenergetski sustav može se svesti na pojednostavnjeni, prikazan na sl. 4, primjenom Theveninova poučka. Impedancije na sl. 5 predstavljaju tada reducirane impedancije na mjestu kvara (v. *Električne mreže*, TE 4, str. 32). Pokretački naponi  $\bar{E}_d$ ,  $\bar{E}_i$  i  $\bar{E}_0$  proporcionalni su naponima u promatranoj točki mreže prije nastanka kratkog spoja.

Tablica 2  
UVJETI NA MJESTU KRATKOG SPOJA

Vrsta kratkog spoja	Stvarne vrijednosti	Simetrične komponente
a-n	$\bar{V}_a = 0$ $\bar{I}_b = 0$ $\bar{I}_c = 0$	$\bar{V}_d + \bar{V}_i + \bar{V}_0 = 0$ $\bar{I}_d = \bar{I}_0$ $\bar{I}_i = \bar{I}_0$
b-c	$\bar{V}_b = \bar{V}_c$ $\bar{I}_a = 0$ $\bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$	$\bar{V}_d = \bar{V}_i$ $\bar{I}_d = -\bar{I}_i$ $\bar{I}_0 = 0$
b-c-n	$\bar{V}_b = 0$ $\bar{V}_c = 0$ $\bar{I}_a = 0$	$\bar{V}_d = \bar{V}_0$ $\bar{V}_i = \bar{V}_0$ $\bar{I}_d + \bar{I}_i + \bar{I}_0 = 0$
a-b-c	$\bar{V}_a = \bar{V}_c$ $\bar{V}_b = \bar{V}_c$ $\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$	$\bar{V}_d = 0$ $\bar{V}_i = 0$ $\bar{I}_0 = 0$
a-b-c-n	$\bar{V}_a = 0$ $\bar{V}_b = 0$ $\bar{V}_c = 0$	$\bar{V}_d = 0$ $\bar{V}_i = 0$ $\bar{V}_0 = 0$

Da se odrede struje i naponi na mjestu kvara, upotrebljava se sustav jednadžbi (30). Budući da on sadrži šest nepoznanica, potrebno je uzevši u obzir vrstu kratkog spoja odrediti još tri jednadžbe. Za pojedine vrste kratkih spojeva ti su uvjeti navedeni u tabl. 2. Pomoću matrice transformacije  $A^{-1}$  pretvoreni su u simetrične komponente. Rješavanjem sustava od šest jednadžbi dobivaju se izrazi za simetrične komponente napona i struja na mjestu kvara. Iz tih napona i struja mogu se odrediti i struje u svim granama mreže, odnosno naponi u pojedinim točkama, a upotrebom matrice transformacije  $A$  izračunavaju se iz simetričnih komponenata stvarne vrijednosti. Izrazi za određivanje simetričnih komponenata struje i napona, te stvarnih veličina na mjestu kvara navedeni su u tabl. 3.

Ako se želi uzeti u obzir i utjecaj simetričnog opterećenja mreže prije nastanka kratkog spoja, odnosno poprečne grane mreže, primjenjuje se zakon superpozicije. Tada se u prvom koraku nađu struje u svim granama i naponi na mjestu kvara u normalnom pogonu. U drugom koraku iskoriste se pronađeni naponi za određivanje pokretačkih napona  $\bar{E}_a$ ,  $\bar{E}_b$  i  $\bar{E}_c$  i izračunaju se struje i naponi uzrokovani kratkim spojem. Zbrajanjem struja iz normalnog pogona i struja uzrokovanih kvarom u direktnom sustavu dobiju se ukupne struje toga sustava. Posljednji korak pri određivanju stvarnih napona i struja isti je kao uz pretpostavku da je mreža prije pojave kvara bila neopterećena.

**Ovisnost struja i napona o omjeru impedancija.** Za tehničku praksu je važno znati ovisnost napona i izmjeničnih komponenata struja na mjestu kratkog spoja o reduciranim impedancijama mreže, te omjer tih veličina za pojedine vrste kratkog spoja. U elektroenergetskim mrežama inverzna je impedancija približno jednaka direktnoj. One se razlikuju samo u rotirajućim dijelovima sustava. Za ilustraciju prilika za vrijeme kvara, a često i za proračun, uzima se da su te dvije impedancije jednake. Radi lakše usporedbe moduli napona zdravih faza mogu se prikazati kao relativne vrijednosti modula linijskog pokretačkog napona mreže u kojoj je nastao kvar, a moduli struja kao relativne vrijednosti modula poprečne struje trolinog

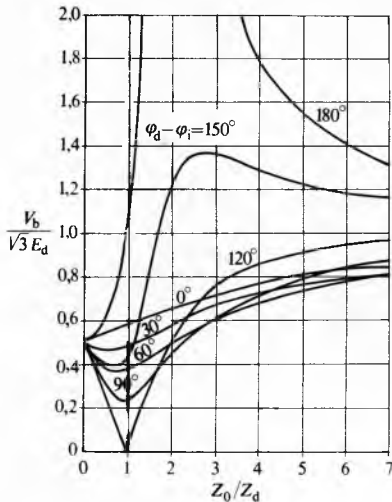
Tablica 3  
NAPONI I STRUJE NA MJESTU KRATKOG SPOJA

Vrsta kratkog spoja	Simetrične komponente	Stvarne vrijednosti
a-n	$\begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \begin{bmatrix} \bar{Z}_i + \bar{Z}_0 \\ -\bar{Z}_i \\ -\bar{Z}_0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \frac{(a^2 - a)\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Z}_i - a\bar{Z}_0 \\ -\bar{Z}_i + a^2\bar{Z}_0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{3\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
b-c	$\begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{Z}_i \bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \frac{\bar{Z}_i \bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{(a^2 - a)\bar{E}_d}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
b-c-n	$\begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{Z}_i \bar{Z}_0 \bar{E}_d}{\bar{Z}_d \bar{Z}_i + \bar{Z}_i \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_d} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d \bar{Z}_i + \bar{Z}_i \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_d} \begin{bmatrix} \bar{Z}_i + \bar{Z}_0 \\ -\bar{Z}_0 \\ -\bar{Z}_i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \frac{3\bar{Z}_i \bar{Z}_0 \bar{E}_d}{\bar{Z}_d \bar{Z}_i + \bar{Z}_i \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_d} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{(a^2 - a)\bar{E}_d}{\bar{Z}_d \bar{Z}_i + \bar{Z}_i \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_d} \begin{bmatrix} 0 \\ -a\bar{Z}_i + \bar{Z}_0 \\ a^2\bar{Z}_i - \bar{Z}_0 \end{bmatrix}$
a-b-c a-b-c-n	$\begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{\bar{E}_d}{\bar{Z}_d} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$

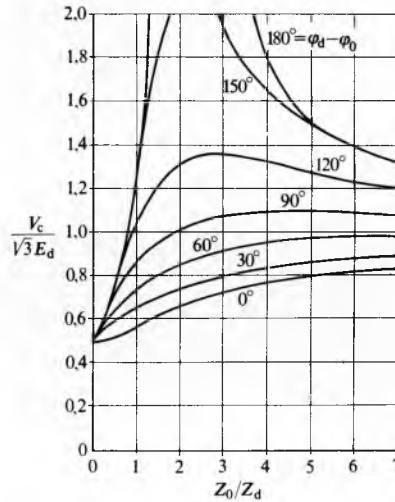
kratkog spoja. Ovisnost relativnih napona i struja za jednopolni kratki spoj o omjeru modula nulte i direktne impedancije i o razlici argumenata direktne i nulte impedancije prikazana je na sl. 6, 7, i 8. Iste ovisnosti za dvopolni kratki spoj s istodobnim spojem sa zemljom prikazuju sl. 9, 10 i 11. Struje dvopolnog kratkog spoja jednake su strujama dvopolnog kratkog spoja s istodobnim spojem sa zemljom kad omjer  $Z_0/Z_d$  ima vrlo veliku vrijednost. Napon faze a jednak je  $2/3$ , a naponi faza b i c jednaki su  $-1/3$  napona faze a pri dvopolnom kratkom spoju s istodobnim spojem sa zemljom uz navedeni omjer impedancija.

modula izolirane mreže, ali je nulta impedancija tada induktivna, pa je razlika argumenata impedancija manja od  $90^\circ$ . Neposredno uzemljena mreža ima omjer modula nulte i direktne impedancije veći od 0,5, a razlika je argumenata direktne i nulte impedancije manja od  $90^\circ$ .

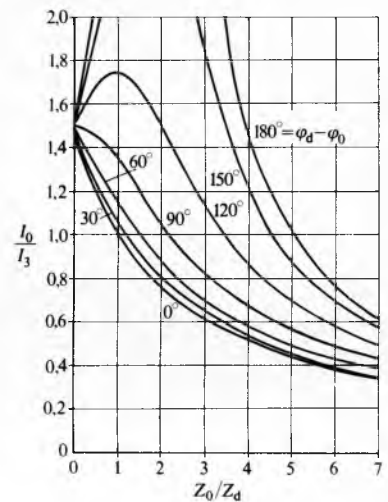
**Vremenske konstante nesimetričnih kratkih spojeva.** Najčešće se najveće struje pojavljuju pri trolpolnom kratkom spoju, pa je takav kratki spoj mjerodavan za termička i mehanička naprezanja (tabl. 1). Da se, međutim, odrede naponi uzemljivača,



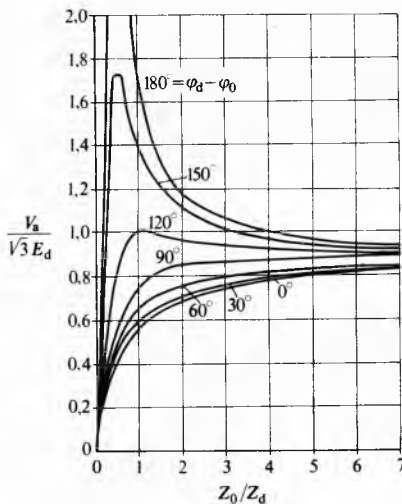
Sl. 6. Relativni napon faze b kad je kratki spoj između faze a i zemlje;  $E_d$  pokretački napon



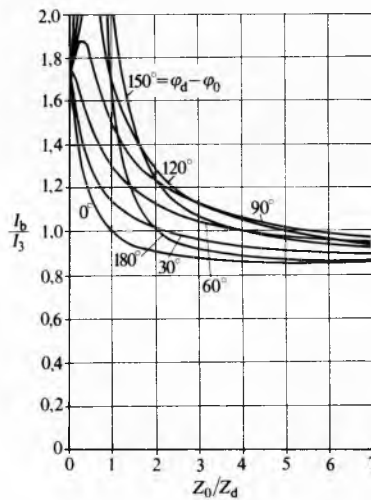
Sl. 7. Relativni napon faze c kad je kratki spoj između faze a i zemlje;  $E_d$  pokretački napon



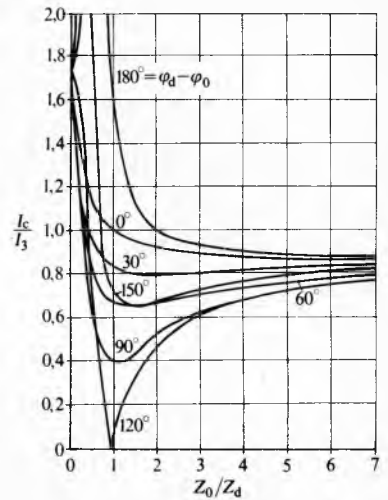
Sl. 8. Relativna struja faze a kad je kratki spoj između faze a i zemlje;  $I_3$  struja trolpolnog kratkog spoja



Sl. 9. Relativni napon faze a kad je kratki spoj između faze b, c i zemlje;  $E_d$  pokretački napon



Sl. 10. Relativna struja faze b kad je kratki spoj između faze b, c i zemlje;  $I_3$  struja trolpolnog kratkog spoja



Sl. 11. Relativna struja faze c kad je kratki spoj između faze b, c i zemlje;  $I_3$  struja trolpolnog kratkog spoja

Odnos nulte i direktne impedancije mreže jako ovisi o načinu uzemljenja zv jezdišta mreže. U mrežama s izoliranom nultočkom omjer je modula impedancija reda veličine 5 i više, a razlika argumenata direktne i nulte reaktancije veća je od  $90^\circ$ , jer je nulta reaktancija kapacitivna. U kompenziranim mrežama, uzemljenim preko induktivnih otpora podešenih prema dozemnim kapacitetima mreže, impedancija nultog sustava ima vrlo veliku vrijednost. Ako je mreža potkompenzirana, ako je, naime odabran induktivni otpor uzemljenja veći od potrebnog za potpunu kompenzaciju, nulta je reaktancija sustava kapacitivna, pa je razlika argumenata veća od  $90^\circ$ , ali je modul nulte impedancije mnogo veći od modula za izoliranu mrežu. U natkompenziranoj mreži, već prema priključenom induktivnom otporu, modul nulte reaktancije može biti i manji od

naponi dodira i induktivni utjecaji, potrebno je analizirati i nesimetrične kratke spojeve.

Omjer impedancije i reaktancije strujnog kruga istosmjerne komponente struje kratkog spoja praktički je neovisan o vrsti kratkog spoja, pa se i vremenska konstanta  $T_{am}$  (2) neznatno mijenja. Također početna vremenska konstanta izmjenične struje  $T_{dm}''$  (7) znatnije ne ovisi o vrsti kratkog spoja. Statorski strujni krug nema veliki utjecaj na njenu vrijednost zbog male razlike između početne i prijelazne reaktancije. To vrijedi za prijelaznu vremensku konstantu  $T_{dm}$  (9). Za proračun prijelazne vremenske konstante struja nesimetričnih kratkih spojeva treba umjesto direktne impedancije uvrstiti reaktanciju prema kojoj je određena promatrana struja kratkog spoja (tabl. 3). Tako se za jednopolni kratki spoj dobiva



$$T'_{dm1} = T'_{d0} \frac{X'_d + X_i + 2Z_{dm} + Z_0}{X_d + X_i + 2Z_{dm} + Z_0}, \quad (29)$$

a za dvopolni kratki spoj

$$T'_{dm2} = T'_{d0} \frac{X'_d + X_i + 2Z_{dm}}{X_d + X_i + 2Z_{dm}}, \quad (30)$$

gdje je  $X_i$  inverzna reaktancija generatora, a  $Z_0$  modul ukupne nulte impedancije. Najveća prijelazna vremenska konstanta pojavljuje se za jednopolni, a manja za dvopolni kratki spoj.

Kratki spojevi koji nastaju bliže generatorima imaju veće struje kratkog spoja i manje vremenske konstante izmjenične struje. Nasuprot tome vrijednost vremenske konstante istosmjerne komponente raste kad se mjesto kvara približava generatorima.

**Ograničenja struja kratkog spoja.** Vrijednosti struja kratkog spoja imaju veliki utjecaj na troškove gradnje elektroenergetskih postrojenja. Njihovo smanjenje obično traži ugradnju novih elemenata u postrojenja ili smanjenje pouzdanosti opskrbe potrošača električnom energijom.

U dijelovima mreže s elektromotornim pogonima struje kratkog spoja ne smiju biti manje od neke minimalne vrijednosti zbog poteškoća s upuštanjem motora. Zbog svega toga za pojedine naponske razine i dijelove mreže određene su granične vrijednosti struja kratkog spoja koje dopuštaju tokom duljeg razdoblja optimalnu gradnju sustava s obzirom na troškove gradnje postrojenja i pouzdanost opskrbe potrošača. Za održanje struja kratkog spoja na određenju razini postoji više načina ovisnosti o mjestu u elektroenergetskom sustavu i o naponskoj razini mreže.

U elektranama se smanjuju struje kratkog spoja izborom viših nazivnih napona generatora, spajanjem generatora na mrežu preko blok-transformatora i odvojenim pogonom generatora.

Mreže srednjeg napona mogu se razdvojiti u manje dijelove. Izborom transformatora preko kojih se napajaju takve mreže s većim naponom kratkog spoja mogu se smanjiti struje kratkog spoja. Na toj naponskoj razini upotrebljavaju se također prigušnice, visokoučinski osigurači i ograničivači udarne struje kratkog spoja. Ako se prevelika struja pojavljuje kad nastane dozemni spoj, odnosno kratki spojevi uz istodobni spoj sa zemljom, ona se smanjuje ugradnjom prigušnica ili otpornika u zvjezdište mreže ili smanjenjem broja uzemljenih zvjezdišta transformatora. Za smanjenje struje kratkog spoja koja se zatvara kroz zemlju iskorištavaju se zaštitni vodiči nadzemnih vodova i plaševi kabela.

Razdvajanjem visokonaponskih mreža na manje dijelove postiže se također smanjenje struja kratkog spoja, ali se time smanjuje i stabilnost takvih mreža. Zbog toga se one povezuju spojkama za ograničenje struje. Te spojke imaju svojstvo da imaju malu impedanciju kad kroz njih teku struje normalnog pogona, ali im se impedancija znatno povećava s povećanjem struje. Umjesto spojki za ograničenje struje u spojne vodove ugrađuju se nadstrujni odvodnici. Oni se spajaju između faznih vodiča i zemlje. Po svojoj građi slični su sklopkama. Imaju veliku uklopnu snagu i vrlo kratko vrijeme uklapanja. Prije nego što struja kratkog spoja postigne vrijednost udarne struje, nadstrujni odvodnik napravi kratki spoj u spojnomvodu. Tako se sprečava da zdrava mreža napaja mjesto kratkog spoja koji je najprije nastao. Smanjenje struje kratkog spoja postiže se i povezivanjem visokonaponskih mreža preko visokonaponskog istosmjernog spoja. Zbog toga što je moguća vrlo brza regulacija struje kroz spoj, može se spriječiti i napajanje pri pojavi kratkog spoja.

LIT.: C. F. Wagner, R. D. Evans, Symmetrical components. McGraw-Hill Book Co., New York 1933. — E. Clarke, Circuit analysis of A—C power systems, vol. I, Symmetrical and related components. J. Wiley and Sons, New York 1943. — A. Hochrainer, Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957. — G. Funk, Der Kurzschluss im Drehstromnetz. R. Oldenbourg Verlag, München 1962. — S. Despotović, Osnovi analize elektroenergetskih sistema. Zajednica jugoslovenske elektroprivrede, Beograd 1962. — H. Edelmann, Berechnung elektrischer Verbundnetze. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1963. — R. Roepfer, Kurzschlußströme in Drehstromnetzen. Siemens Schuckert-

werke A. G., Erlangen 1964. — F. W. Kloepfel, H. Fiedler, Kurzschluss in Elektroenergiesystemen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969. — G. Funk, Kurzschlußstromberechnung. Elitera-Verlag, Berlin 1974. — W. D. Stevenson, Elements of power system analysis. McGraw-Hill Book Co., New York 1975. — H. Požar, Visokonaponska rasklopna postrojenja. Tehnička knjiga, Zagreb 1978.

V. Filipović

**KRISTALIZACIJA**, stvaranje kristala, prijelaz tvari iz nesređenog u sređeno, kristalno stanje. Sređeno stanje nije neizmjernog dosega, već se sastoji od volumnih jedinica — kristala. Kristali mogu postojati kao izdvojena tijela — jedinični kristali (monokristali), a također i kao nakupine kristala — kristalni agregati (v. *Kristalografija*). Kristalizacija može nastati u plinskoj i tekućoj fazi. Pojam kristalizacije obuhvaća također nastajanje i rast kristala unutar čvrste faze, što se naziva *rekristalizacijom*. Riječ kristalizacija dolazi od grčkog *κρυσταλλος* kristallos *led*.

Kristalizacija se počela proučavati među znanostima vezanim uz ispitivanja Zemljine kore, geologije s mineralogijom i petrologijom. U današnje vrijeme kristalizacija se proučava interdiciplinarno uz pomoć niza prirodnih znanosti. Za razumijevanje procesa kristalizacije potrebne su spoznaje o strukturi, morfologiji i svojstvima kristala, a termodinamici i kinetici kristalizacije itd.

Praktična primjena kristalizacije vrlo je velika. Tu je u prvom redu dobivanje čvrstih produkata u kemijskoj tehnologiji. Osobito je važna *fraksijska kristalizacija* kojom se međusobno odjeljuju različite kristalne tvari.

Posebno mjesto u oblasti kristalizacije zauzima teorijski i eksperimentalni rad na umjetnom priređivanju jediničnih kristala. U prirodi se, naime, nalaze jedinični kristali samo ograničenog broja tvari. Osim toga, prirodni kristali većinom sadrže različite primjese, a česte su i nepravilnosti u njihovom rastu. Napredak fizike i kemije čvrstog tijela kroz proteklih pedeset godina pripisuje se, između ostalog, i razvoju niza metoda za rast kristala različitih tvari. Kristali su važni i u tehničkoj praksi. Tako npr., bez umjetno priređenih kristala silicija i germanija ne bi bilo današnje tehnike poluvodiča (v. *Poluvodiči*).

### NUKLEACIJA

Nukleacijom se općenito naziva proces kojim se rađa nova faza bez obzira o kojoj se faznoj transformaciji radi. Nukleacija, prema tome, neposredno prethodi procesu nastajanja i rasta kristala.

Nukleacija u kojoj sudjeluje samo jedna vrsta tvari naziva se *homogenom nukleacijom*. Teorija nukleacije postavljena je na osnovi modela kondenzacije plinova i para. U kaotičnoj plinovitoj fazi atomi ili molekule plina redovito se međusobno sudaraju. Tako se stvaraju veće ili manje nakupine osnovnih čestica ili nukleusi. Stvoreni nukleusi nisu stabilni i lako se ponovno disociraju. Osnovne čestice sustava i nukleusi nalaze se u dinamičkoj ravnoteži:



Uz povoljne uvjete, tj. ako koncentracija čestica A raste, može nastati tzv. kritični nukleus  $A_x$ :



koji ima sposobnost nastaviti rast spontanom procesom:



Prema teorijama M. Volmera (1939) i J. Frenkela (1946), promjena slobodne energije nukleusa,  $\Delta G^0$ , jednaka je sumi promjene slobodne energije volumena i površinske energije:

$$\Delta G^0 = V \Delta G_V + S \sigma, \quad (6)$$