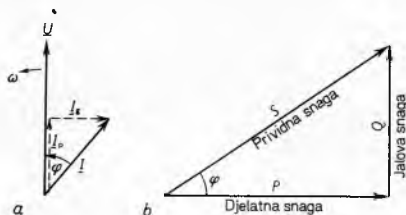


**FAKTOR SNAGE I NJEGOVA KOMPENZACIJA U ENERGETSKIM POSTROJENJIMA I MREŽAMA.** Faktor snage može se općenito predstaviti izrazom  $\lambda = g \cos \varphi_1$ , gdje je  $g$  faktor koji se odnosi na nesinusne struje i napone, a  $\varphi$  fazni kut osnovnog vala. Za izmjeničnu struju sinusnog oblika (napona i struje) faktor je snage definiran odnosom djelatne (aktivne) snage  $P$  i prividne snage  $S$ :  $\cos \varphi = P/S$ . Prividna snaga je u jednofaznom sistemu jednaka umnošku efektivnog napona  $U$  i efektivne struje  $I$ ,  $S = U \cdot I$ , a djelatna snaga je  $P = S \cos \varphi = U I \cos \varphi$ . Kut  $\varphi$ , kojim je definiran faktor snage, zatvaraju u vektorskom dijagramu za izmjeničnu struju (sl. 1 a) između sebe radijvektori napona  $\underline{U}$  i struje  $\underline{I}$ .

Vektorski dijagrami (v. *Elektrotehnika*, str. 133) služe za predočavanje vremenskog slijeda, zbroja i razlike radijvektora izmjeničnih veličina. Radijvektori (fazori, kazaljke ili, kratko, vektori) označeni su u ovom članku, na mjestima gdje ih treba naročito istaći, velikim potcrtanim slovima.



Sl. 1. Vektorski dijagram (a) i dijagram (trokut) snaga (b) za krug izmjenične struje

Kut  $\varphi$  je pozitivan kad struja zaostaje za naponom (kao u primjeru sl. 1 a), tj. kad je u krug uključen neki induktivni otpor  $X_L = \omega L$ , a negativan je kad struja prethodi naponu, tj. kad je u krugu struje uvršten neki kapacitivni otpor  $X_C = 1/\omega C$ .

Vrijednost faktora snage može varirati između 0 i 1.

Na sl. 1 a radijvektor struje  $\underline{I}$  rastavljen je na crtkano prikazane komponente: djelatnu struju  $\underline{I}_p = I \cos \varphi$  (koja je u fazi s naponom) i jalovu struju  $\underline{I}_q = I \sin \varphi$ , koja u danom primjeru zaostaje za naponom za  $90^\circ$ . Pomnože li se radijvektori  $\underline{U}$ ,  $\underline{I}_p$  i  $\underline{I}_q$  radijvektorom  $\underline{U}$ , dobije se prividna snaga  $S$ , djelatna snaga  $P$  i jalova snaga  $Q$ . Te su veličine prikazane na sl. 1 b u sličnom pravokutnom trokutu kao i struje na sl. 1 a. U tom dijagramu snaga  $\underline{S}$  rastavljena je prividna snaga na djelatnu i jalovu pa je  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . Iz dijagrama se vidi da je djelatna snaga

$$P = S \cos \varphi = U I \cos \varphi,$$

a jalova snaga

$$Q = S \sin \varphi = U I \sin \varphi,$$

gdje se  $\sin \varphi$  zove *faktor jalovosti*. Analogno kao za faktor snage vrijedi:  $\sin \varphi = Q/S$ .

Jedinica za snagu je vat (W). Ta se jedinica, međutim, u elektrotehnici upotrebljava obično samo za snagu istosmjernje struje i djelatnu snagu izmjenične struje, a za prividnu i jalovu snagu upotrebljava se često — da bi razlika između pojedinih vrsta snaga bila uočljivija — jedinica volt-amper, VA (za prividnu snagu), odnosno volt-amper reaktivni ili var, VAR (za jalovu snagu).  $1 \text{ VA} = = 1 \text{ VAR} = 1 \text{ W}$ .

Ako je napon sinusan, a struja nije, za djelatnu snagu vrijedi odnos  $P = U I_1 \cos \varphi_1$ , gdje je  $I_1$  efektivna struja osnovnog vala, a  $\varphi_1$  fazni pomak između napona  $U$  i te struje. Prividna snaga ( $S_1$ ) i jalova snaga ( $Q_1$ ) definirane su tada također za osnovni val. Za djelatnu snagu mjerodavan je samo osnovni val. Ako se pak želi definirati, kao kod sinusnog napona i struje, prividna snaga pomoću struje nadvalova ( $I_2, I_3, \dots$ ), treba uzeti  $S = U I = U \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$ , a jalovu snagu  $Q = = \sqrt{S^2 - P^2}$ . Faktor snage se dobije prema izrazu

$$\lambda = \frac{P}{S} = g \cos \varphi_1, \quad (1)$$

gdje je  $\cos \varphi_1$  faktor snage osnovnog vala, a  $g = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}}$  faktor koji daje udio osnovnog vala u nesinusnoj struji.

Ako su napon i struja nesinusni, posebno se govori o faktoru snage osnovnog vala i faktorima snage nadvalova prema analognom pojmu snage.

U elektroprivredi se često susreće *srednji (obračunski) faktor snage* koji se dobije na temelju odnosa evidentirane jalove i dje-

latne energije u toku određenog vremenskog razdoblja, npr. jednog dana, mjeseca ili godine. On se dobije iz izraza  $\tan \varphi = = W_q/W$ , gdje je  $W$  djelatna energija (redovno u kWh ili MWh), a  $W_q$  jalova energija (redovno u kVARh ili MVARh). Dobiveni  $\tan \varphi$  preračuna se u odgovarajući  $\cos \varphi$  koji predstavlja srednji faktor snage za promatrano vremensko razdoblje.

Općenito se može reći da je kod različitih proračuna i usporedbi vrlo često prikladnije operirati s izrazom  $\tan \varphi = Q/P$ , jer izražava direktan omjer snaga, nego sa  $\cos \varphi$ . Odnos između ta dva faktora je ovaj:

$\cos \varphi$	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65
$\tan \varphi$	0,00	0,33	0,48	0,62	0,75	0,88	1,02	1,17

**Trošila i izvori jalove induktivne snage.** Što je faktor snage manji to se uz neku određenu djelatnu snagu prenosi više jalove snage.

Elektroenergetski sistem dobavlja petrošačima i djelatnu i jalovu snagu. Nekim je trošilima (npr. pećima s otpornicima, žaruljama) potrebna samo djelatna snaga; u većini drugih trošila pojavljuje se magnetsko polje, pa je njima potrebna i djelatna snaga i induktivna jalova snaga. Jalova energija potrebna za stvaranje magnetskog polja uzima se iz mreže, a prilikom razgradnje magnetskog polja ona se vraća u mrežu. Jalova energija, dakle, nije se dvostrukom mrežnom frekvencijom između izvora i trošila (v. *Elektrotehnika*, str. 139). Za njenu proizvodnju, npr. u sinhronom generatoru, nije potrebna dodatna energija jer je srednja vrijednost jalove snage jednaka nuli.

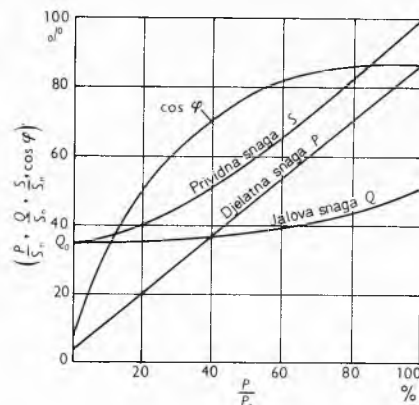
Sinhroni generator proizvodi induktivnu (pozitivnu) jalovu snagu kad je preuzbuđen, a kapacitivnu (negativnu) jalovu snagu kad je poduzbuđen. Isto tako ponašaju se i sinhroni motori (v. str. 376): kad su preuzbuđeni, oni primaju kapacitivnu i daju induktivnu jalovu snagu, a kad su poduzbuđeni, primaju induktivnu i daju kapacitivnu jalovu snagu. Ako, dakle, u nekom čvorištu mreža djeluje na generator kao poduzbuđeni sinhroni motor, jalova će snaga biti pozitivna.

Može se općenito reći da su izvori induktivne jalove snage potrošači kapacitivne, a potrošači induktivne jalove snage dobavljači kapacitivne.

Potrošači u elektroenergetskom sistemu troše praktički uvijek induktivnu jalovu snagu, pa prema tome moraju u sistemu postojati izvori koji je dobavljaju i time vrše kompenzaciju.

U elektroenergetskom sistemu troše jalovu induktivnu snagu uglavnom: asinhroni motori, transformatori, usmjerivači, poduzbuđeni sinhroni motori i različite prigušnice (ed malih za fluorescentne sijalice do velikih visokonaponskih prigušnica).

Faktor snage *asinhronih motora*, tih najbrojnijih trošila jalove induktivne snage, ovisi o njihovom opterećenju, njihovoj veličini (nazivnoj snazi) i njihovoj konstrukciji. Iz pogonske se karakteristike (sl. 2) vidi da neopterećeni asinhroni motor ima



Sl. 2. Pogonske karakteristike niskonaponskog sinhronog motora snage 35 kW, 1000 o/min.  $P_n$  Nazivna djelatna snaga motora,  $S_n$  nazivna prividna snaga motora

vrlo nizak faktor snage. Povećanjem opterećenja faktor snage naglo raste, pa pri punoj snazi dosegne najveću vrijednost, koja se kreće između 0,75 i 0,90. (Niže vrijednosti odnose se na manje, a više na veće motore.) Uzrok je poboljšanju faktora snage pojava

da pri opterećenju, tj. porastu djelatne snage, jalova snaga (krivulja  $Q$ ) tek lagano raste od vrijednosti praznog hoda do punog opterećenja. Povećanjem broja polova, primjenom zatvorenih izvedbi i motora s kliznim kolutima, faktor snage postaje niži. Kad se napon mreže snizi ispod nominalnoga, asinhroni motor smanjuje potrošak jalove snage.

**Transformatori**, za razliku od asinhronog motora, u praznom hodu troše malo jalove snage  $Q_0$ , pri opterećenju potrošak jalove snage  $Q_q$  naglo raste s opterećenjem. Ukupni potrošak jalove snage transformatora iznosi  $Q_T = Q_0 + Q_q$ . Moderni transformatori s hladno valjanim limovima troše neopterećeni jalovu snagu koja iznosi od 0,2 do 2% nazivne snage. (Najmanje vrijednosti se odnose na velike jedinice visokog napona, a najveće na male distributivne transformatore.)

Transformator predstavlja vrlo visoki induktivni otpor čiji je pokazatelj napon kratkog spoja  $u_k$  (v. *Transformator*). Struja opterećenja stvara u transformatoru velike gubitke jalove snage; oni se povećavaju s kvadratom struje opterećenja. Prema tome, jalova snaga koju uzima transformator nazivne snage  $S_n$ , napona kratkog spoja  $u_k$ , opterećen prividnim opterećenjem  $S$ , iznosi

$$Q_q = u_k S_n \left( \frac{S}{S_n} \right)^2$$

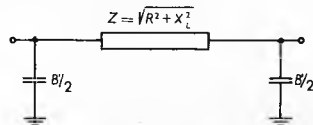
Uz nazivno opterećenje transformator troši jalove snage toliki postotak od svoje nazivne snage koliki je  $u_k$  izražen u postocima od nazivnog napona (4...12%).

Za pogon neupravljivih *usmjerivača* (ispravljača) potrebna se jalova snaga sastoji od jalove snage potrebne za transformator i jalove snage komutacije. Faktor snage osnovnog vala ovih uređaja obično je vrlo dobar, no on se pogoršava zbog nadvalova. Da se dobije ukupni faktor snage (za osnovni val i nadvalove) treba prema jedn. (1) uzeti u obzir i faktor  $g$ . Tada je  $\lambda = g \cos \varphi_1$ . Kod upravljivih usmjerivača faktor snage je znatno lošiji.

**Indukcione peći** redovno rade s faktorom snage 0,5, ali on tokom rada znatno varira između 0,5 i 0,75.

Različite prigušnice (npr. prigušnice za sniženje kapacitivnih snaga neopterećenih nadzemnih vodova, prigušnice za smanjenje struje kratkog spoja, i sl.), troše samo induktivnu jalovu snagu.

**Nadzemni visokonaponski vodovi** mogu biti i potrošači i dobavljači induktivne jalove snage, već prema njihovom opterećenju. Visokonaponski *neopterećeni* trofazni vod, koji se može prikazati pojednostavnjenom nadomjesnom shemom prema sl. 3, stavljen pod napon  $U$ , vlada se kao kondenzator, jer uzima kapacitivnu, a proizvodi induktivnu jalovu snagu;  $Q_0 = 3 U^2 \omega C = U^2 \omega C$ . ( $C$  je ukupni kapacitet voda promatrane duljine, a  $\omega$  kružna frekvencija  $\omega = 2 \pi f$ .) Dobivena jalova snaga je, dakle, razmjerna kvadratu napona. Visokonaponski *opterećeni* trofazni vod troši jalovu snagu razmjernu kvadratu struje po fazi  $Q_q = 3 I^2 \omega L$ , gdje je  $L$  ukupni induktivitet promatrane duljine voda. Ukupna jalova induktivna snaga koju traži vod iznosi  $Q_v = Q_q - Q_0$ .



Sl. 3. Pojednostavnjena nadomjesna  $\Pi$ -shema nadzemnog voda

Nekom određenom pogonskom naponu odgovara neka određena struja opterećenja uz koju se postiže da je  $Q_q = Q_0$ , pa vod niti daje niti uzima jalovu snagu. To se dešava kad je vod opterećen svojom prirodnom snagom (v. *Dalekovodi*, TE 3, str. 159). Uz opterećenje ispod prirodne snage vod se vlada kao kondenzator, a iznad prirodne snage kao induktivitet. U tabl. 1 navedene su za vodove standardiziranih napona: tipične

Tablica 1  
KARAKTERISTIČNI PODACI ZA VODOVE STANDARDIZIRANIH NAPONA

Napon voda, kV	10	35	110	220	380
Reaktancija, $X' = \omega L'$ , $\Omega/\text{km}$	0,35	0,38	0,41	0,42	0,33
Susceptancija, $B' = \omega C'$ , $\mu\text{S}/\text{km}$	3,26	3,01	2,76	2,67	3,46
Prirodna snaga, MW	0,3	3,4	32	120	515
Proizvedena jalova snaga, MVA/100 km	0,033	0,37	3,34	13,0	50,0

konstante po kilometru voda, prirodna snaga voda i proizvodnja jalove snage na 100 km duljine. Kao što se vidi, vodovi najviših napona proizvode vrlo velike jalove snage, s tim više što su takvi vodovi često vrlo dugački.

**Posljedice toka jalovih snaga.** Tok jalovih snaga u mreži prouzrokuje djelatni gubitak, gubitak napona i smanjenje propusne moći vodova i transformatora.

Jalove snage u djelatnim otporima vodova i transformatora proizvode  *dodatne djelatne gubitke*  razmjerne kvadratu jalove struje. Djelatni gubici prijenosa neke djelatne snage  $P$ , ako se ona prenosi uz neki faktor snage  $\cos \varphi$ , povećavaju se u omjeru  $1 : 1/\cos^2 \varphi$  (sl. 4, krivulja A). Npr. pri prijenosu uz  $\cos \varphi = 0,8$ , gubici se povećavaju 1,56 puta, tj. za 56% u odnosu prema gubicima kod prijenosa samo djelatne snage  $P$ .

Jalova je snaga glavni uzročnik *gubitka napona*  $\Delta U$  u nadzemnim vodovima i transformatorima. Taj gubitak napona iznosi uz neka zanemarenja

$$\Delta U = I R \cos \varphi + I X_L \sin \varphi.$$

Transformacijom dobije se iz toga izraz za približni procentni gubitak napona

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{100 P}{U^2} (R + \tan \varphi \cdot X) \%, \quad (2)$$

gdje je  $P$  djelatna snaga koja se prenosi,  $U$  linijski napon mreže,  $R$  djelatni otpor voda i  $X$  induktivni otpor voda,  $\tan \varphi = Q/P$ .

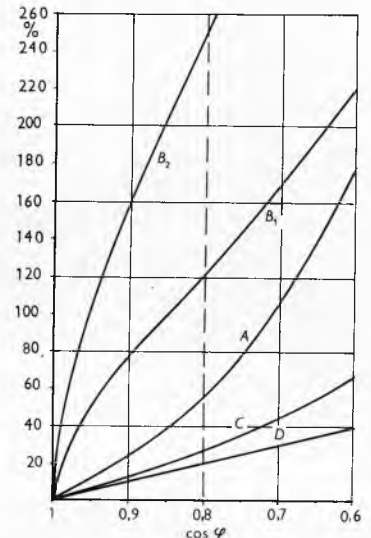
Formula važi kao brojičana također ako se umjesto koherentnih jedinica uvrste u nju  $P$  u MW,  $U$  u kV, a  $R$  i  $X$  u  $\Omega$ .

Budući da je djelatni otpor  $R$  voda po fazi za vodove viših napona nekoliko puta manji od induktivnog otpora  $X_L$ , utjecaj jalove snage na gubitak napona vrlo je velik. Npr. (sl. 4, krivulja  $B_1$ ), ako se prenosi neka djelatna snaga vodom 35 kV, s vodičima 120/20 Ač uz  $\cos \varphi = 0,8$ , gubitak napona bit će 125% veći nego ako se prenosi sama djelatna snaga. U vodu od 110 kV s vodičima 240/40 Ač (sl. 4, krivulja  $B_2$ ), povećanje će iznositi 255%. U vodovima još viših napona praktički samo jalova snaga ima utjecaja na gubitak napona u vodu.

U kabelima je utjecaj prijenosa jalove snage na gubitak napona daleko manji nego u nadzemnim vodovima, jer je induktivitet kabela po kilometru znatno manji (1/10...1/5), a kapacitet mnogo veći (nekoliko desetaka puta).

Opterećenje nadzemnih vodova, kabela i transformatora ograničeno je određenom maksimalnom strujom, tj. određenom prividnom snagom  $S$ , pri nazivnom naponu. Što je u toj prividnoj snazi veća jalova komponenta to manja može biti djelatna komponenta, u skladu s relacijom  $P = \sqrt{S^2 - Q^2}$ . U sl. 4, krivulja C pokazuje za koliko veću struju mora biti neki od spomenutih elemenata mreže dimenzioniran u ovisnosti o faktoru snage prijenosa. Npr. za  $\cos \varphi = 0,8$  uređaj se mora dimenzionirati za 25% veću struju. Ili, drugim riječima, pojavom jalove snage elementima mreže dimenzioniranim za nazivnu prividnu snagu  $S$  smanjuje se moć propuštanja djelatne snage  $P$ . Koliko postotaka iznosi to smanjenje za različite faktore snage prikazuje sl. 4, krivulja D. Npr. za  $\cos \varphi = 0,8$  smanjenje iznosi 20%.

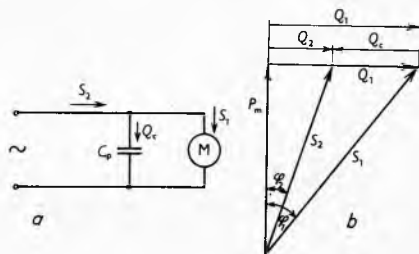
**Kompenzacija jalovih snaga kod potrošača.** S obzirom na nepoželjne posljedice prijenosa induktivnih jalovih snaga, njihov tok treba u mreži svesti na najmanju moguću mjeru, te izvore



Sl. 4. Procentualno povećanje djelatnih gubitaka prijenosa (A), gubitak napona ( $B_1$  i  $B_2$ ), povećanje dimenzioniranja naprava (C), i procentualno smanjenje propusne moći mreže (D), kod različitih faktora snage  $\cos \varphi$  u odnosu na prijenos samo djelatne snage  $P$

napajanja jalovom snagom što više približiti mjestu potrošnje. To se postiže ako se kod samog potrošača provodi pojedinačna, grupna ili centralna kompenzacija.

**Pojedinačna kompenzacija jalove snage** provodi se na svakom pojedinom trošilu. Ako se npr. asinhronom motoru koji uzima iz mreže djelatnu snagu  $P_m$  i jalovu induktivnu snagu  $Q_1$  paralelno priključi kondenzator (sl. 5 a) koji proizvodi induktivnu jalovu snagu  $Q_c$ , njihova će kombinacija uzimati iz mreže razliku jalovih snaga  $Q_2 = Q_1 - Q_c$ . Prividna će se snaga, uz nepromijenjenu djelatnu snagu  $P$ , smanjiti od  $S_1$  na  $S_2$  (sl. 5 b).



Sl. 5. Kompensacija induktivne jalove snage asinhronog motora paralelno priključenim kondenzatorom (a) uz pripadni vektorski dijagram (b)

Priključenjem kondenzatora smanjuje se također kut između djelatne i prividne snage od  $\varphi_1$  na  $\varphi_2$ , a faktor snage će se time povećati, tj. poboljšati. Opisanim se postupkom provodi tzv. **paralelna kompenzacija** jalove snage motora, odnosno, jednostavnije rečeno, kompenzacija motora.

Za popravak faktora snage od  $\cos \varphi_1$  na  $\cos \varphi_2$  i smanjenje prividne snage od  $S_1$  na  $S_2$  (sl. 5 b) potrebna je određena jalova snaga kondenzatora  $Q_c$ . Ona je jednaka razlici  $Q_1 - Q_2$ , pa je  $Q_c = Q_1 - Q_2$ , odnosno,

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2).$$

Ako se pak želi uz poznati potrošak jalove energije  $W_a$  (očitan na brojilu) naći potrebnu snagu  $Q_c$  kondenzatora koji treba ugraditi da se postigne određeni srednji (obračunski) faktor snage  $\cos \varphi_2$  za vrijeme  $t$  pogonskih sati, ona se može izračunati z relacije:

$$Q_c = \frac{W_a - W \tan \varphi_2}{t},$$

gdje je  $W$  djelatna energija očitana na brojilu.

Pojedinačna je kompenzacija asinhronih motora ekonomična kad je motor u stalnom pogonu, a za priključak kondenzatora nisu potrebne posebne sklopke i osigurači. Snaga priključnog kondenzatora odabire se prema jalovoj snazi praznog hoda motora, a da sigurno ne dođe do samouzbuđenja motora (tj. da motor ne radi kao generator struja viših harmoničkih frekvencija) odabire se kondenzator koji ima za 10% manju snagu od jalove snage koju motor preuzima u praznom hodu. Snaga kondenzatora za kompenzaciju trofaznog motora može se, dakle, izračunati s pomoću brojčane jednadžbe

$$Q_c = 0,9 I_0 U \sqrt{3} \cdot 10^{-3} \text{ kVAr},$$

gdje je  $I_0$  struja praznog hoda motora u amperima, a  $U$  linijski napon mreže u voltima. Snaga kondenzatora za manje asinhronne motore (do 10 kW) iznosi ~50% nazivne snage motora, a za veće ~30%.

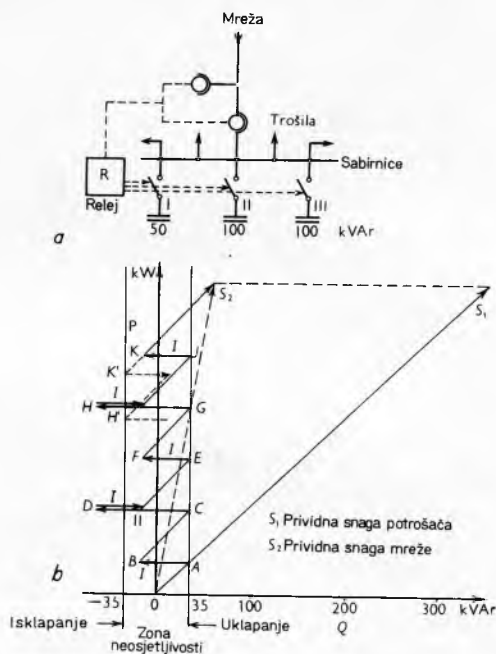
Radi pojedinačne kompenzacije transformatora, kondenzator se veže na sekundarni namot i u načelu se dimenzionira za jalovu snagu praznog hoda transformatora. Ako će transformator biti trajno dovoljno opterećen, može se tako kompenzirati i dio jalove snage tereta. Strojevi za lučno svarivanje redovno imaju ugrađeni kondenzator. Ako nemaju, ugrađuje se kondenzator kojemu je snaga ~50% snage transformatora.

Fluorescentne sijalice imaju zbog ugrađene prigušnice vrlo loš faktor snage, pa mnoga distributivna poduzeća traže obaveznu kompenzaciju. Npr., ako se želi kompenzirati fluorescentna sijalica od 40 W na  $\cos \varphi = 0,95$ , treba ugraditi kondenzator od ~70 VAR.

**Grupna kompenzacija** provodi se kad se želi kompenzirati jalova snaga od više sličnih trošila (npr. grupe motora ili grupe fluorescentnih sijalica). Ako se trošila ne uključuju grupno nego pojedinačno, treba paziti da ne dođe do prekompenzacije. Ako postoji ta mogućnost, treba kondenzator opremiti posebnom sklopkom i automatikom za njegovo isklapanje.

**Centralna kompenzacija** jalove snage provodi se za trošila cijelog nekog pogona na jednom mjestu. Svrha je takve kompenzacije u prvome redu rasterećenje pojne mreže, odnosno ušteda na troškovima za prekomjerni potrošak jalove snage ili energije. U unutarnjoj mreži pogona ne mijenja se i ne poboljšava time ništa. Općenito uzevši, centralna kompenzacija treba manje instalirane snage u kondenzatorima nego pojedinačna kompenzacija, jer sva pojedina trošila ne rade istovremeno. Da bi se snaga kompenzacije mogla prilagoditi momentanom opterećenju potrošača, redovno nije dovoljno da se kondenzatori jednostavno ručno uklapaju i isklapaju, već je prilagođivanje potrebno provesti automatskim uklapanjem grupâ kondenzatorskih baterija.

Primjer takve kompenzacije prikazan je na sl. 6 a. Energija dolazi iz mreže na sabirnice, odakle se napajaju trošila. Na sabirnice su također priključene tri grupe kondenzatorskih baterija za kompenzaciju jalove snage. Sklopke baterija vezane su na uređaj R koji ih automatski uklapa i isklapa u ovisnosti o nekoj graničnoj veličini preuzimane jalove snage. Kad npr. preuzeta induktivna jalova snaga dostigne 35 kVAr (sl. 6 b) automatika proradi i uklapa pojedine grupe kondenzatora. Kad opterećenje poraste do točke A, uključuje se I grupa kondenzatora od 50 kVAr i radna točka pada u B. U trenutku kad uslijed daljeg porasta opterećenja potrošnja jalove snage opet dostigne 35 kVAr (točka C), uklapa se II kondenzatorska grupa od 100 kVAr i pogonska točka premješta se u D. Time nastaje prekompenzacija, pa dolazi do automatskog isklapanja grupe I. Ako tada opterećenje naraste do točke E, dolazi ponovo do uklapanja grupe I, itd., sve dok opterećenje ne naraste toliko da su uključene sve tri kondenzatorske baterije. Pri padu opterećenja teče isklapanje sličnim redom. Prvo isklapanje nastaje kad prekompenzacija dostigne točku K', itd. Opisana kompenzacija može se provesti bilo na visokom bilo na niskom naponu, već prema veličini pogona i načina obračunavanja jalove snage ili energije.



Sl. 6. Centralna kompenzacija jalove snage za trošila nekog pogona. a) Shematski prikaz, b) redoslijed uklapanja kondenzatora po grupama

U pogonima koji imaju sinhronne motore može se, osim kondenzatorima, kompenzacija vršiti vrlo ekonomično i preuzbuđivanjem tih motora. Prednosti su takve kompenzacije vrlo mali pogonski troškovi, te njena brza i kontinuirana regulacija.

Posebne probleme kompenzacije izazivaju industrijski potrošači koji imaju vrlo promjenljivo djelatno i induktivno opterećenje. Ako su promjene brze i znatne, one izazivaju, naročito u slabijim mrežama, neugodne promjene napona. Osobito je neugodno za rasvjetu i televizore kad promjene imaju frekvenciju oko 3-8 Hz (flikeri). Opisane neugodne prilike izazivaju npr. lučne električne peći i strojevi željezara koji se napajaju istosmjernom strujom iz usmjerivača. Kompenzacija kondenzatorskim baterijama u takvom slučaju ne zadovoljava, osim za

kompensaciju osnovnog, nepromjenljivog dijela opterećenja. Promjenljivo se opterećenje donedavna moglo kompenzirati samo sinhronim kompenzatorima s brзом regulacijom uzbude. Danas se takva kompensacija postiže statičkim kompenzatorima kojima se kompenzaciona snaga može mijenjati uz pomoć elektroničkih uređaja čak brže nego uzbuda sinhronih kompenzatora.

Način i opseg kompenzacije kod potrošača ovisi prvenstveno o dobavnim uvjetima elektroprivrednog poduzeća. Tarifa može bazirati na postignutoj jalovoj snazi i potrošenoj jalovoj energiji ili nekom minimalnom obračunskom faktoru snage. Propisane mogu biti i granične naponske smetnje.

**Kompensacija jalovih snaga u mreži.** Osim priključenih potrošača, jalovu snagu troše i pojedini elementi mreže na svim naponskim nivoima.

U tabl. 2 dan je primjer podjele djelatne i jalove snage u sistemu koji se napaja iz jedne pojne točke 220/110 kV a kojim se opskrbljuje područje sjeverozapadne Hrvatske. Iz tablice se vidi veliki procentni udio jalove snage transformatora u prijenosnoj mreži; vodovi 110 kV, pak, opterećeni su oko svoje prirodne snage, jer praktički imaju samo djelatne gubitke.

Tablica 2

BILANCA SNAGA ZA PODRUČJE SJEVEROZAPADNE HRVATSKE dana 16. XII 1970 u 20 sati

Mjesto potrošnje	MW	MVAr	%,	cos φ
Konzum i distributivna mreža	422	202	74,2	0,902
Transformatori 110/35 kV	—	54	19,9	—
Transformator 220/110 kV	—	15	5,5	—
Vodovi 110 kV	8	1	0,4	0,991
<b>Ukupno</b>	<b>430</b>	<b>272</b>	<b>100,0</b>	<b>0,844</b>

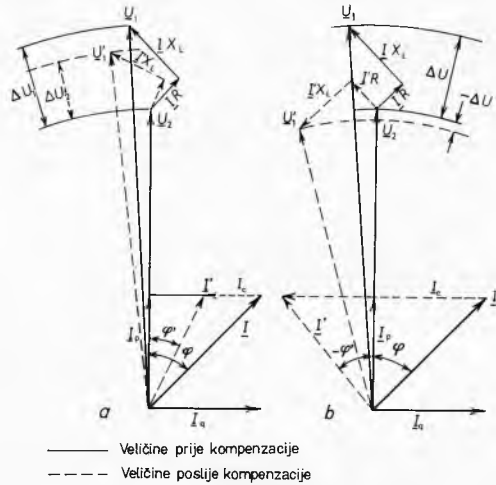
I u slučajevima kad je provedena kompenzacija kod potrošača, ona iz ekonomskih razloga ne obuhvaća svu potrebnu jalovu snagu, već njen manji ili veći dio, što prvenstveno ovisi o tarifnim odnosima. Prema tome moraju izvori u mreži, uz potrebe same mreže, dobavljati i dio jalove snage potrošačima.

Redovno se nastoji da distribucija što potpunije kompenzira potrebe potrošača i sredjenaponske mreže, kako bi se prijenosni vodovi na višim naponskim nivoima što više rasteretili jalove snage. Distribucija redovno preuzima energiju uz određeni minimalni faktor snage, koji se u nekim zemljama kreće čak između 0,95 i 0,98. Za kompenzaciju se prvenstveno iskorištavaju naduzbuđeni sinhroni generatori elektrana vezanih na mrežu srednjeg napona. Nekada, dok su mreže bile male a elektrane manje snage i locirane geografski i električki blizu potrošača, svu potrebnu jalovu snagu mogli su dati generatori koji su tada građeni s niskim nazivnim faktorom snage (0,70...0,80). Danas se grade veliki agregati, snage nekoliko stotina megavata, koji se priključuju na mrežu najviših napona. Njihovi su nazivni faktori snage mnogo viši i kreću se između 0,85 i 0,95. Proizvedena se jalova snaga troši na dotičnom naponskom nivou i malo ili nikako se ne prenosi u mreže nižih napona. Kako distributivne mreže prenose sve veće snage, koje preuzimaju iz superponiranih mreža, potrebno je u prikladnim čvorištima pribjeći kompenzaciji. Rasporod i veličina kondenzatorskih baterija, ili, općenito, izvorā jalove snage u mreži (uključivši i generatorā), vrši se na temelju minimalizacije djelatnih gubitaka — uz limitirane napone — i godišnjih troškova u sistemu.

**Naponske prilike i tokovi jalovih snaga.** Tokovi jalovih snaga u mreži i naponske prilike čvrsto su jedni s drugima povezani. Svaka promjena jalove snage jako se odrazuje na napon i to s tim više što su induktivni otpori mreže veći. Kako su oni znatni upravo u nadzemnim visokonaponskim mrežama, redovno je cilj kompenzacije na višim naponskim nivoima održavanje napona, dok je u mrežama nižih napona osnovna svrha kompenzacije smanjenje djelatnih gubitaka.

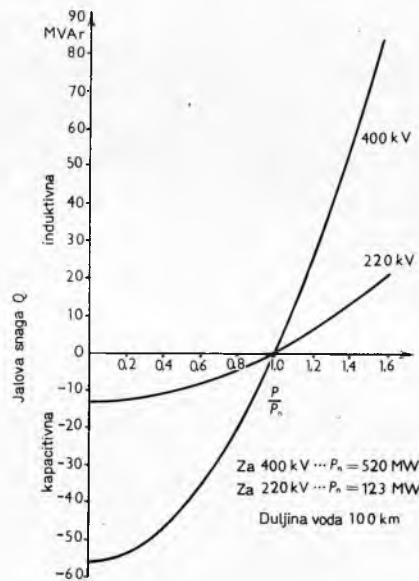
Vektorski dijagramom prijenosa na sl. 7 a prikazan je primjer promjene napona u visokonaponskoj mreži nakon kompenzacije. Induktivna jalova struja  $I_q$  djelomično je kompenzirana strujom  $I_c$ . Time se ukupna struja smanjila od  $I$  na  $I'$ , a razlika napona od  $\Delta U_1$  na  $\Delta U_2$ . Na sl. 7 b prikazan je primjer znatne prekompenzacije, čak tolike da je napon  $U_2$  na kraju voda veći od napona  $U_1$  na njegovu početku.

Budući da su u mrežama vrlo visokih napona posrijedi velike jalove snage ovisne o opterećenju voda, posebno se postavlja



Sl. 7. Vektorski dijagram visokonaponskog voda. a) Poboljšanje naponskih prilika nakon kompenzacije, b) naponske prilike u slučaju prekompenzacije

problem njihove kompenzacije. Na sl. 8 nacrtane su za nadzemni vod 220 kV i 400 kV, duljine 100 km, potrebe jalove snage u ovisnosti od odnosa  $P/P_n$ , tj. od odnosa snage opterećenja i prirodne snage voda. Npr. neopterećeni vod 400 kV traži ~55 MVAr kapacitivne jalove snage, dok opterećen snagom koja je za 50% veća od prirodne snage traži ~70 MVAr induktivne jalove snage.



Sl. 8. Jalova snaga Q voda 220 kV i 400 kV u ovisnosti o odnosu stvarne snage opterećenja P i pripadne snage  $P_n$

Navedeni su odnosi, naravno, još više izraženi kad su vodovi dulji i kad su prijenosni naponi viši. Danas su u svijetu već u pogonu vodovi 765 kV (Kanada, USA, SSSR), a ispituje se mogućnost prijenosa s naponom 1000...1500 kV. Za te napone postavit će se problem jalove snage u još oštrijem obliku, jer npr. 100 km voda 1500 kV u praznom hodu proizvodi induktivnu jalovu snagu od ~800 MVAr.

Kako neopterećeni ili slabo opterećeni visokonaponski vod djeluje kao kondenzator i proizvodi velike induktivne jalove snage koje teku u mreži, može doći u pojedinim točkama do nedopuštenog povišenja napona. Najpovoljnije je ako ove snage mogu preuzeti poduzbuđeni generatori u elektranama. To, međutim, često nije moguće zbog nepovoljne lokacije elektrana

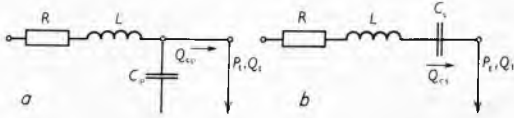
i/ili zbog ograničene mogućnosti da generatori rade u poduzbuđenom području. U takvim se slučajevima u prikladne točke mreže priključuju prigušnice (reaktori). Naprotiv, kad su visokonaponski vodovi jako opterećeni, mora postojati mogućnost da dobiju induktivnu jalovu snagu potrebnu da ne bi došlo do prevelikog gubitka napona ili čak do naponskog sloma i ispada sistema. Do abnormalno visokih opterećenja može doći npr. nakon havarija i ispada elektrana i vodova, pa zdravi dijelovi mreže moraju prenositi ispalu snagu. U takvim prilikama sistem mora raspolagati rezervnim izvorima induktivne jalove snage koji mogu odmah intervenirati. I u ovom slučaju je najpovoljnije ako traženu jalovu snagu mogu dati generatori elektrana. Ukoliko to iz bilo kojeg razloga nije moguće, treba u mreži izgraditi kompenzacione uređaje. Redovno se u takvim slučajevima ne mogu upotrijebiti kondenzatorske baterije, ili se mogu upotrijebiti samo djelomično, jer su promjene potrošnje suviše brze. Stoga treba ugraditi sinhronne kompenzatore odgovarajuće snage koji su, istina, skuplji od kondenzatora, ali imaju veliku prednost što je regulacija njima brza i kontinuirana i što mogu preuzeti ulogu prigušnice.

Kako bi se izbjegla upotreba skupih rotacionih strojeva, danas se nastoji riješiti problem elastične kompenzacije u mrežama pomoću statičkih kompenzatora koji su se već afirmirali u kompenzaciji industrijskih pogona.

#### Serijska i paralelna kompenzacija kondenzatorima.

Osim paralelnim priključkom kondenzatora uz trošilo, kompenzacija se može provesti i serijskim uklapanjem kondenzatora u vod (sl. 9).

Osnovna je razlika između kompenzacije serijski uvrštenim i kompenzacije paralelno uvrštenim kondenzatorom u tome što kroz serijski kondenzator protječe struja opterećenja, te je njegova jalova snaga razmjerna kvadratu struje, a paralelni je kondenzator vezan na napon opterećenja i njegova jalova snaga razmjerna je kvadratu tog napona. Prema tome primjenom serijskog kondenzatora djeluje se uglavnom na promjenu napona, a primjenom paralelnog kondenzatora na promjenu struje.



Sl. 9. Jednopolna shema paralelne (a) i serijske (b) kompenzacije.  $P_t$  i  $Q_t$  djelatna i jalova snaga trošila,  $Q_{cp}$  i  $Q_{cs}$  jalove snage paralelnog ( $C_p$ ), odnosno serijskog ( $C_s$ ) kondenzatora za kompenzaciju

Uz određeno nazivno opterećenje može se istim iznosom jalove snage i serijskim i paralelnim uvrštenjem kondenzatora postići jednak popravak faktora snage na početku voda, no razlika nastaje kad je opterećenje različito od nazivnog. Kroz serijski kondenzator protječe struja opterećenja, pa se s povećanjem opterećenja proizvodi sve više induktivne jalove snage. Zbog toga se s povećanjem opterećenja faktor snage sve više poboljšava. Paralelni kondenzator priključen je na praktički konstantan napon, pa je faktor opterećenja voda u praznom hodu čisto kapacitivan ( $\cos \varphi = 0$ ), ali s povećanjem opterećenja voda on se sve više približava vrijednosti  $\cos \varphi = 1$ , te uz puno opterećenje postiže odabranu vrijednost faktora snage. Glavna je prednost serijskog kondenzatora što ne može doći do prekompenzacije pri malim opterećenjima. Budući da je uređaj serijskih kondenzatora skuplji od uređaja paralelnih kondenzatora iste snage, a osim toga zbog porasta opterećenja u budućnosti treba uzeti serijske kondenzatore nešto veće snage, općenito uzevši, s gledišta poboljšanja faktora snage, najekonomičnije je rješenje s paralelnim kondenzatorima.

Ako se pak kompenzacija provodi u svrhu poboljšanja naponskih prilika, izbor tipa kompenzacije ovisi o karakteristikama prijenosnog uređaja (nadzemni vod ili kabel) i o jalovoj snazi koja se prenosi.

Kompenzacijom se općenito djeluje na smanjenje drugog člana formule (2) za procentni gubitak napona  $\Delta U/U$ . Paralelnom kompenzacijom smanjuje se induktivna jalova snaga  $Q_q$  u vodu

za snagu kondenzatora  $Q_c$ , čime se smanjuje  $\tan \varphi = Q_q - Q_c/P$ . Serijskom se kompenzacijom smanjuje induktivni jalovi otpor  $X_L$  voda za kapacitivni otpor kondenzatora  $X_c$ , čime se smanjuje ukupna reaktancija  $X = X_L - X_c$ . Na temelju iznesenih konstatacija može se za konkretni slučaj donijeti odluka o vrsti kompenzacije. U tabl. 3 prikazane su mogućnosti primjene kompenzacije sa serijskim i paralelnim kondenzatorima za pojedine slučajeve.

Tablica 3  
MOGUĆNOSTI PRIMJENE KOMPENZACIJE S POMOĆU KONDENZATORA

Djelovanje	Kondenzator	
	paralelni	serijski
Popravak faktora snage	×	(×)
Povišenje napona, ako se nadzemnim vodom prenosi opterećenje s niskim faktorom snage	(×)	×
Povišenje napona, ako se nadzemnim vodom prenosi opterećenje s visokim faktorom snage	×	—
Povišenje napona, ako se kabelom prenosi opterećenje s niskim faktorom snage	—	×
Povišenje napona, ako se kabelom prenosi opterećenje s visokim faktorom snage	—	—
Smanjenje gubitka prijenosa	×	(×)
Smanjenje kolebanja napona	—	×

OZNAKA: × prvenstveni izbor, (×) izbor u drugom redu, — ne dolazi u obzir

Znatna je prednost regulacije napona serijskom kompenzacijom u tome što je ona kontinuirana. Ta prednost dolazi do izražaja naročito kad se pojavljuju velike varijacije napona zbog naglih promjena opterećenja.

Smanjenje gubitaka u vodu može se postići s pomoću oba načina kompenzacije, ali, općenito uzevši, paralelna kompenzacija ima prednost zbog niže cijene uređaja.

Budući da se serijskom kompenzacijom smanjuje ukupna reaktancija prijenosnog voda, dugi vod postaje time električki kraći pa se može znatno više opteretiti, a da se ne ugroze naponske prilike i stabilnost pogona.

Prvi put u svijetu upotrijebljeni su 1953 u Švedskoj serijski kondenzatori za povećanje prijenosne moći voda napona 380 kV. Npr. uz kompenzaciju od 40% na vodu napona 380 kV, sa snopom od 3 užeta po fazi, duljine ~1000 km, povećana je prijenosna moć od 460 MW na 700 MW.

Sredstva za kompenzaciju jalove snage dijele se na rotirajuće i statičke. Rotirajuće su naprave: sinhroni generatori, sinhroni motori i sinhroni kompenzatori, a statičke naprave kondenzatori, prigušnice i statički kompenzatori.

*Sinhroni generatori i motori.* Za sinhronne strojeve općenito vrijedi da preuzbuđeni djeluju kao kondenzatori, a poduzbuđeni kao prigušnice. Sinhroni generatori i motori su građeni i eksploatirani prema potrebama za djelatnom snagom, pa njihovo mjesto u mreži, sa gledišta kompenzacije, često nije najpovoljnije. Generatori građeni za niži nazivni faktor snage su skuplji, pa prilikom narudžbe treba utvrditi, među ostalim, i njihovu ulogu u mreži kao proizvođača jalove snage (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 195).

Ako stroj uz djelatnu proizvodi i jalovu snagu, gubici stroja su naravno veći. Pri punom nazivnom opterećenju gubici u generatoru iznose 7...13 kW/MVAr.

U poduzbuđenom stanju generator radi rjeđe. Mogućnost proizvodnje jalove snage u takvom stanju daleko je manja nego u naduzbuđenom području. Preniska uzbuda može imati za posljedicu nestabilan rad stroja i preveliko ugrijavanje. Generator kao izvor jalove snage ne traži nikakvo posebno održavanje i nadzor. On je još danas glavni dobavljač induktivne jalove snage u sistemu.

*Sinhroni kompenzator* je u stvari sinhroni motor u praznom hodu koji je građen samo za proizvodnju jalove snage. Nazivna snaga stroja odgovara mogućnosti proizvodnje jalove snage u preuzbuđenom stanju. Poduzbuđen stroj u ulozu prigušnice može dati samo ~60...70% nazivne snage. Danas se takvi strojevi proizvode većinom za snage od 20 do blizu 200 MVAr.



Za pokrivanje mehaničkih i električnih gubitaka kompenzator uzima iz mreže djelatnu snagu (1...2% nazivne snage). U većim jedinicama gubici su procentualno manji.

Sinhroni kompenzatori su vezani na tercijarni namot mrežnog transformatora, najčešće napona 10 kV. S obzirom na to da su ugrađeni u čvorištima mreže, izgrađeni su redovno za montažu na otvorenom. Specifične investicije, gubici i održavanje su veći nego za kondenzatore, no glavna im je prednost da se njihovo opterećenje može brzo i kontinuirano regulirati u velikom opsegu od kapacitivnog do induktivnog područja.

Još je nužno napomenuti i to da za vrijeme poremećaja u sistemu i jakih sniženja napona, kad je jalova snaga najpotrebnija, snaga kondenzatora pada s kvadratom napona, dok sinhroni kompenzator može održati nominalnu snagu u dosta širokim granicama napona.

Električni kondenzator je najčešće i najraširenije sredstvo za kompenzaciju induktivne jalove snage. U današnje se elektroenergetske mreže ugrađuju kondenzatori za znatne snage i s mogućnošću priključka do najviših naponskih nivoa. Naravno da takve zahtjeve ne može ispuniti jedan kondenzatorski element, već je potrebno vezati veći broj manjih elemenata, prema potrebi, paralelno i u seriju i složiti ih u bateriju. Kondenzatorski element ima oblik limene kutije s jednim, dva ili tri provodna izolatora, prema tome da li je izveden jednofazno s priključkom na kutiju, jednofazno izolirano ili trofazno.

Redovno se kondenzatori za kompenzaciju na niskom naponu grade kao trofazni elementi za unutarnju montažu, a visokonaponski u jednofaznoj izvedbi za ugradnju na otvorenom — no to nije pravilo. Danas se kondenzatorski elementi za visoki napon grade do snaga od nekih 200 kVAr i maksimalni napon 10...12 kV. Na sl. 10 prikazana su četiri elementa jednofaznih visokonaponskih kondenzatora snage 50, 100, 150 i 200 kVAr.



Sl. 10. Kondenzatorski elementi od 50, 100, 150 i 200 MVAR za ulaganje u baterije

Međutim, elementi kondenzatorske baterije nisu građeni kao jedan kondenzator, već kao skup serijski i paralelno vezanih kondenzatorskih smotaka. Smotku čine dvije trake od aluminijske folije izolirane papirom, papir-propilenom ili nekom plastičnom izolacijom. Neki proizvođači upotrebljavaju smotke od metaliziranog papira. Smotke su prije bile uronjene u izolaciono mineralno ulje, a danas se sve više za tu svrhu upotrebljavaju klorirani ugljikovodici (Clophen, Pyralen, Sorol i dr., v. *Elektrotehnički materijali*, str. 85). Pojedine smotke grade se za snagu od 0,1 do 2 kVAr i napone od 700 do 1200 V.

Između snage  $Q_c$  jednofaznog kondenzatora i njegovog kapaciteta  $C$  postoji odnos

$$Q_c = U^2 \omega C, \quad (3)$$

gdje je  $U$  nazivni napon, a  $\omega$  kružna frekvencija (koja pri mrežnoj

frekvenciji 50 Hz iznosi  $314 \text{ s}^{-1}$ ). Za trofazne kondenzatore vrijedi jednadžba

$$Q_c = 3 U_r^2 \omega C. \quad (4)$$

gdje je  $U_r$  fazni napon.

Da bi se jednadžbe (3) i (4) mogle upotrijebiti kao brojčane formule za izračunavanje snage  $Q_c$  u kVAr uz uvrštavanje napona  $U$  u kV, kapaciteta  $C$  u  $\mu\text{F}$  i kružne frekvencije  $\omega$  u  $\text{s}^{-1}$ , desne im strane treba pomnožiti sa  $10^{-2}$ .

Kao što se vidi, snaga kondenzatora je proporcionalna kvadratu napona, s čime u pogonu treba računati.

Gubici u kondenzatorima su mali i kreću se od 0,1 do 0,7% nazivne snage kondenzatora.

Paralelni kondenzatori moraju biti dimenzionirani za maksimalni napon postrojenja i zaštićeni protiv velikih struja. Na protiv, serijski kondenzatori moraju biti dimenzionirani za maksimalnu struju voda i zaštićeni protiv previsokih napona koji se pojavljuju prilikom kratkog spoja.

Kod sklapanja kondenzatora treba paziti da ne dode do opasnih prenapona i do visokih struja. Osobito se velike struje izjednačenja javljaju prilikom paralelnog uklapanja kondenzatora na kondenzatore koji su u pogonu. Prekidači za sklapanje kondenzatora moraju biti posebne konstrukcije da bi mogli besprijekorno isklapati kapacitivne struje.

Tražene snage postižu se paralelnim slaganjem više elemenata u baterije; za više napone, pak, elementi se spajaju u seriju. Regulacija snage kondenzatora moguća je samo u stupnjevima, što je relativno sporo; stoga kondenzatori nisu pogodni za kompenzaciju brzih promjena.

Prigušnice za kompenzaciju kapacitivnih jalovih snaga vodova vrlo visokog napona građeni su slično kao transformatori, ali na željeznoj jezgri imaju samo jedan namot, a jezgra ima obično zračni zazor. Prigušnice se priključuju na mrežu na dva načina: direktno se priključuju tamo gdje se rijetko isključuju, a vodovi su veće duljine, pa je potrebno radi smanjenja prenapona omogućiti pražnjenje preko prigušnica; indirektno se priključuju preko tercijarnog namota mrežnog transformatora na srednjim naponima 10...30 kV. Indirektno priključene prigušnice predviđene su za češće uklapanje.

Prigušnice mogu biti vrlo velike snage; npr. na mrežu 735 kV u Kanadi direktno su priključene po tri jednofazne jedinice koje imaju trofaznu jalovu snagu od 330 MVAR.

Statički kompenzatori zovu se naprave koje nemaju pokretnih dijelova, ali se njima jalova snaga može regulirati brzo i kontinuirano pa mogu vrlo dobro zamijeniti skupe sinhronne kompenzatore. Ova vrsta kompenzatorskih uređaja danas je još u razvitku i za kompenzaciju u prijenosnim mrežama tek se počinje uvoditi u upotrebu. Inače se takvi uređaji prvenstveno primjenjuju za kompenzaciju brzih i vrlo promjenljivih jalovih snaga industrijskih potrošača.

Danas su vrlo interesantna rješenja koja su se razvila na temelju tehnike energetske elektronike kao što su kondenzatori vezani preko poluvodičke sklopke, kondenzatorska baterija vezana paralelno s prigušnicom preko poluvodičke sklopke i prisilno komutirani usmjerivač.

U britansku je mrežu napona 275 kV priključen prototip statičkog kompenzatora koji se sastoji od prigušnice kojoj se može jalova snaga dodatnim magnetskim tokom kontinuirano regulirati od 0 do 30 MVAR, i od tri kondenzatorske baterije po 20 MVAR. Takvom se kombinacijom može kontinuirano mijenjati jalova snaga od 30 MVAR induktivno do 60 MVAR kapacitivno. Uređaj je priključen na tercijarni namot transformatora od 13 kV.

LIT.: E. Bornitz, Leistungskondensatoren und Blindleistungsmaschinen, Oldenburg-München 1965. — Grupa autora (VDE), Blindleistung, Berlin 1965. — R. Pelissier, Les réseaux d'énergie électrique, Paris 1971. — F. Henze, Blindstrom und Leistungsfaktor, Berlin 1971. — V. i literaturu članka *Elektrotehnika*.

B. Markovčić

**FAZNE RAVNOTEŽE**, stanja ravnoteže heterogenih sustava, ali i područje fizikalne kemije u kojem se ta stanja proučavaju. Pristup tom proučavanju može biti vrlo širok, pa u krajnjoj liniji ono može, izuzevši neka uska područja, obuhvatiti i cijelu kemijsku termodinamiku. Zbog toga dublje razumijevanje područja zahtijeva i poznavanje termodinamike u cijelosti, o kojoj će biti opširnije govora u člancima *Termodinamika* i *Termodinamika, kemijska*. U ovom se članku objašnjavanja s tog područja nužno ograničavaju na najpotrebnija. Također, zbog mnoštva različitih pojedinačnih slučajeva, ni opisivanje pojedinih