

Kada se ovaj prelazni član sabere sa ustaljenim članom u trenutku paljenja luka, dobija se najviši napon neoštećenih faznih provodnika u iznosu:

$$U_2 = (1,5E + \frac{6C_0}{C_i}E) \quad (513)$$

što za slučaj $C_0 = C_i$ daje 7,5 E.

I ova teorija ima svojih zamerki, a to su: da se takođe zanemaruje prigušenje kao i kod prethodne, isto tako zanemaruju se slobodne oscilacije koje nastaju pri gašenju luka, a i sama pretpostavka da se luk pali kada je napon u maksimumu nije tako logična i ostvarljiva. No i pored svega ovoga, poznati su praktični slučajevi da su prenaponi pri zemljospoju sa lukom zaista imali vrlo velike vrednosti.

Prema eksperimentalnim rezultatima Beljakova može se zaključiti da se pojave prenapona pri zemljospoju sa lukom događaju i prema jednoj i prema drugoj teoriji, tokom jednog zemljospoja, u zavisnosti od niza lokalnih faktora na mestu zemljospoja.

3. FEROREZONANSA

Pod linearnom rezonansom u električnom kolu sa konstantnim parametrima podrazumeva se režim pri kome je prinudna učestanost izvora bliska sopstvenoj učestanosti kola. U tom slučaju se javljaju povećanja amplitude struje i napona. Amplituda je u ovom slučaju ograničen omskim otporom kola.

Pod nelinearnom rezonansom se podrazumeva pojava da se u kolu sa nelinearnim parametrima, promenom režima menja sopstvena učestanost kola. U energetskim sistemima je nelinearni parametar najčešće induktivnost sa gvozdanim jezgrom, pa se iz tog razloga ova pojava naziva ferorezonansom.

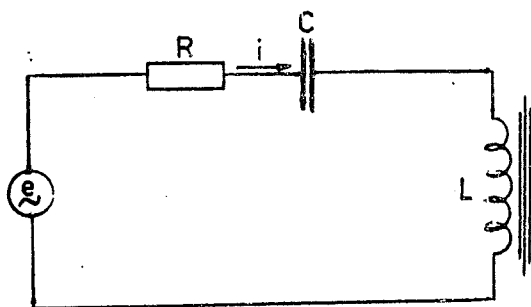
Osnovni uslov za nastajanje ferorezonanse je da je prinudna učestanost izvora između sopstvenih učestanosti kola pre i posle zasićenja induktivnog kalema sa gvozdanim jezgrom.

Prema konfiguraciji elemenata razlikujemo rednu i paralelnu ferorezonansu.

3.1 Redna ferorezonansa

Šema kola u kome posmatramo pojavu redne ferorezonanse data je na sl. 174.

Diferencijalna
jednačina po drugom Kir-
hofovom zakonu za ovo ko-
lo je:



$$e = Ri + \frac{d}{dt}(Li) + \frac{1}{C} \int i dt \quad (514)$$

Da bi analizirali režim
rada ovog kola, zanemari-
ćemo sve više harmonike u
kolu. Neka je karakteristi-
ka magnećenja induktivnosti

sl. 174

data funkcijom $U_L = f(I)$. Na osnovu gornje diferencijalne jednačine
može se pomoću efektivnih vrednosti napisati sledeća jednačina:

$$E^2 = R^2 I^2 + \left(U_L - \frac{I}{C\omega} \right)^2 \quad (515)$$

Fazni pomeraj struje prema ems dat je jednačinom:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - \frac{I}{C\omega}}{RI} \quad (516)$$

Jednačinu (515) rastavimo na dve jednačine:

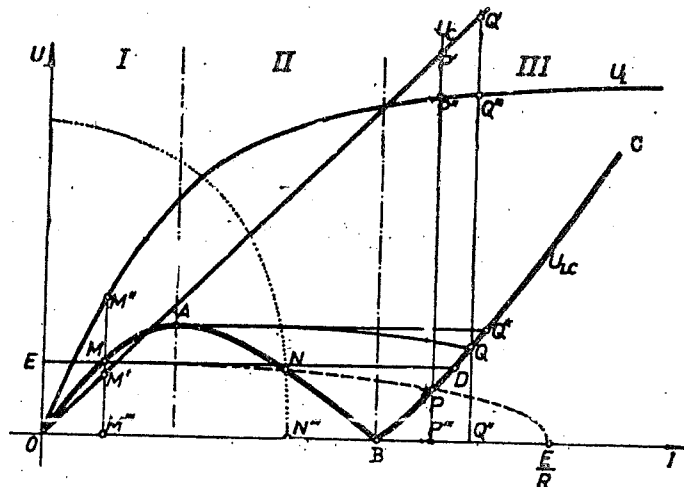
$$U_{LC} = \left| U_L - \frac{I}{C\omega} \right| \quad (517)$$

$$R^2 I^2 + U_{LC}^2 = E^2 \quad (518)$$

Ako jednačinu (518) podelimo sa E^2 , dobiće se:

$$\frac{I^2}{E^2} + \frac{U_{LC}^2}{E^2} = 1 \quad (519)$$

Nacrtajmo krive linije koje jednačine (517) i (518) predstavljaju



sl. 175

Napon U_{LC} se dobija oduzimanjem napona $\frac{I}{C\omega}$ od napona U_L (jednačina 517). Jednačina (518) daje elipsu čije su poluose $\frac{E}{R}$ i E , sa centrom u koordinatnom početku.

Tačka A u kojoj kriva U_{LC} ima maksimum odgovara kolenu zasićenja karakteristike magnećenja. Tačka B odgovara rezonantom režimu rada, jer su u toj tački jednaki induktivni i kapacitivni padovi napona u kolu, tako da je struja kroz kolo čisto aktivna. Posle tačke B napon na krajevima kola ponovo raste.

Režim u kolu se određuje u preseku krive $U_{LC} = E^2 - R^2 I^2$ i $U_{LC} = \left| U_L - \frac{I}{C\omega} \right|$. Pri toj ili pri nižim vrednostima napona postoje tri tačke preseka ovih krivih. U tački M se povećanjem napona E povećava i struja kroz kolo. Ovaj režim naziva se stabilnim. U tom slučaju je $\text{tg} \varphi > 0$, tj. struja je induktivna.

Tačka N odgovara nestabilnom režimu rada kola. Na tom delu krive sa povećanjem napona struja se smanjuje, i obrnuto, kao kod negativnih impedansi.

U tački P je režim opet stabilan, jer se povećanjem napona raste i struja kroz kolo. U ovoj tački je $\operatorname{tg}\varphi < 0$, pa je režim kapacitivan.

Na dijagramu možemo razlikovati tri oblasti. Oblast I odgovara stabilnom režimu rada sa malim strujama, oblast II odgovara nestabilnom režimu rada, a oblast III odgovara stabilnom režimu rada sa velikim strujama.

Sa promenom napona od nule, ose elipse se povećavaju srazmerno i radna tačka se kreće po delu krive OA u stabilnoj oblasti u režimu malih struja. U trenutku kad se dodje do tačke A, radna tačka se skokovito premešta u tačku Q. U tački Q pri vrlo velikoj struji, naponi na induktivnosti i kapacitetu su dati dužima $Q''Q'$ i $Q''Q''$, dok je ukupan napon na krajevima kola $Q''Q$. Vidi se da se prelaskom u radnu tačku Q povećavaju naponi na kapacitetu i induktivitetu i da se struja kroz kolo naglo poveća pri nekom naponu E na krajevima kola.

Ako bi sad smanjivali napon, radna tačka bi se kretala po krivoj BC, a tek kad napon U_{LC} postane jednak nuli, dolazi do skoka na karakteristiku OA. U tački B ukupan napon na krajevima kola jednak je samo naponu na aktivnom otporu.

Moguće je podešavanjem ems E i otpora kola R, postići da elipsa ima samo jednu presečnu tačku sa krivom OABC, koja može biti u bilo kojoj od tri oblasti. Na slici je tačkasto ucrtan slučaj kada je jedna presečna tačka u nestabilnoj oblasti.

Ako se na ovakvo kolo priključi ems koju variramo od nule, elipsa će počevši od tačke O ostati uvek slična samoj sebi a radna tačka će se kretati po krivoj $\left| U_L - \frac{I}{C\omega} \right|$ sve do tačke A, gde elipsa tangira ovu krivu. Ako se napon i sada poveća radna tačka sa dela OA odnosno iz tačke A, skače u tačku Q na delu BC krive i nastupa opet stabilno stanje, ali pri većoj struji. Ako sada ems E počne da opada radna tačka se kreće po delu BC i ne skače na deo OA, tj. zadržava se radno stanje pri velikoj struji. Za jednu datu ems mogu dakle biti dve radne tačke M i P pa napon na kapacitetu može imati dve vrednosti $M''M'$ i $P''P'$, a napon na induktivitetu takodje dve vrednosti $P''P''$, $M''M''$.

Da bi se dogodio prelaz sa radne tačke M, na drugu radnu tačku P potrebno je izvesno povišenje napona koje može nastati u samom radu usled kakvog isključenja ili uključenja. Radna tačka P ostaje i dalje čak i kada napon opadne na svoju početnu ili nižu vrednost. Pri tome u kolu imamo veliku struju i visoke napone na kapacitetu i induktivitetu koji mogu biti veoma opasni po izolaciju istih. Ovo stanje može ostati trajno ukoliko

se napon ne isključi ili uopšte nastane kakva bitna promena u električnom kolu (prekid kola, proboj izolacije itd.).

Iz prednjeg izlaganja i na osnovu sl. 175 može se zaključiti sledeće:

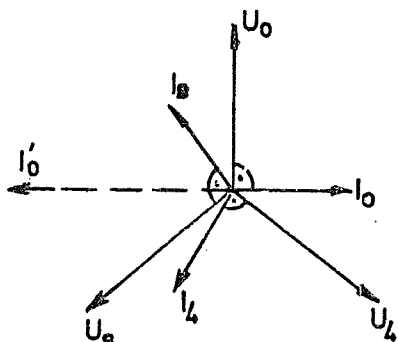
1. Ferorezonansa nastupa u svim onim slučajevima kada se kapacitativni otpor kola nalazi između induktivnog otpora kola pre i posle zasićenja, tj. oblast u kojoj može nastati ferorezonansa mnogo je šira no kod obične rezonanse.

2. Ovde amplituda struje nije ograničena otporom R , već zasićenjem samog magnetnog kola. Ovo se da lako zaključiti sa dijagrama jer ako je $R = 0$ umesto elipse imamo pravu $U=E$ koja je tangenta na elipsu u tački E te umesto radne tačke P imamo radnu tačku D pri naponu na krajevima kola $E=U_{LC}$. U ovoj tački je struja nešto veća, a i naponi su takodje viši, ali su ipak ograničeni zasićenjem induktivnosti.

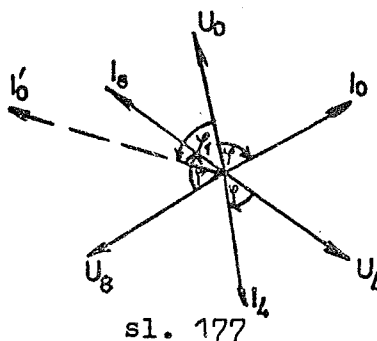
3. Prenaponi usled ferorezonanse nastupaju odmah po promeni stanja rada i traju beskonačno.

Pored ove grafičke pretežno kvalitetne metode, postoji i računaska metoda, koja uz izvesna zanemarenja i pretpostavke daje mogućnost da se izračunaju vrednosti prenapona pri ferorezonansi.

Pojava ferorezonanse omogućava da se objasni pojava okretanja faznog reda struje u sistemu, koje može dovesti do toga da motori priključeni na ovakvu mrežu promene smer obrtanja.



sl. 176



sl. 177

Pretpostavimo da imamo simetričan trofazni sistem napona prema sl. 176, sa odgovarajućim simetričnim strujama koje fazno zaostaju iza napona za $\frac{\pi}{2}$ i da na jednoj fazi nastane ferorezonansa. Struja ove faze u slučaju rezonanse postaje veća i kapacitivna i okreće se za 180° u odnosu na početni položaj (struja

I'_0 na sl.176). Prvobitni fazni red struja (I_0 , I_4 i I_8) u smeru kazaljke na satu na sl.176, postaje u slučaju ferorezonanse obrnut od smera kazaljke na satu (I'_0 , I_4 i I_8) i nesimetričan.

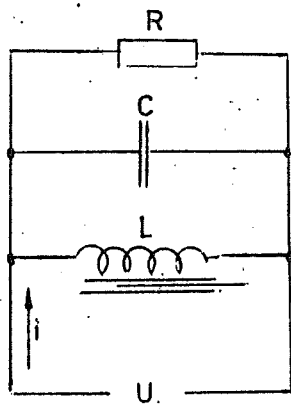
U slučaju kada struja ne zakašnjava iza napona za $\frac{\pi}{2}$ već za proizvoljan ugao φ (vidi sl. 177) može nastati okretanje faznog reda struja samo ako je ispunjen uslov $\varphi > \frac{2\pi}{3} - \varphi$ tj. $\varphi_1 + \varphi > \frac{2\pi}{3}$ gde je φ_1 ugao između vektora napona U_0 i kapacitivne struje I'_0 posle nastanka ferorezonanse u toj fazi.

3.2 Paralelna ferorezonansa

Paralelna ferorezonansa nastaje u kolu u kome su paralelno priključeni induktivnost sa gvozdanim jezgrom i kapacitet. Pored toga, u kolu može postojati i omski otpor R. Jedno takvo kolo dato je na sl. 178.

Diferencijalna jednačina za ovo kolo je:

$$i = \frac{U}{R} + \int \frac{1}{L} u dt + c \frac{dU}{dt} \quad (520)$$



sl. 178

na dve:

$$I_{LC} = |C\omega U - I_L| \quad (522)$$

$$\frac{U^2}{R^2} + I_{LC}^2 = I^2 \quad (523)$$

I u ovom slučaju ćemo zanemariti više harmonike. Neka je data karakteristika $i_L = f(U)$ struje kroz induktivnost sa gvozdanim jezgrom u funkciji napona. U ovom slučaju važi jednačina za efektivne vrednosti.

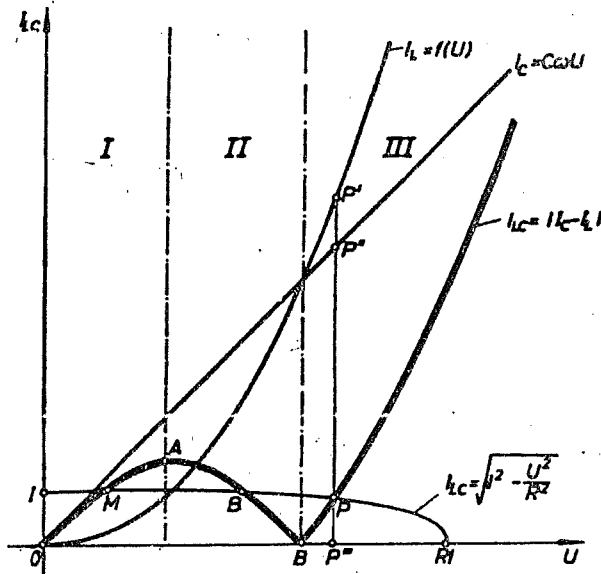
$$I^2 = \frac{U^2}{R^2} + (C\omega U - I_L)^2 \quad (521)$$

Gornju jednačinu rastavimo

Ako i levu i desnu stranu jednačine (523) podelimo sa I^2 dobija se:

$$\frac{U^2}{(RI)^2} + \frac{I_{LC}^2}{I^2} = 1 \quad (524)$$

Nacrtajmo krive date izrazima (522) i (523)



sl. 179

U ovom slučaju kriva $I_{LC} = |I_C - I_L|$ je dobijena oduzimanjem krive I_L od I_C . I ova kriva ima u oblasti I stabilan rad koja odgovara kapacitivnoj struji u oblasti malih napona. U oblasti II imamo nestabilan rad, jer sa povećanjem struje se smanjuje napon dok u oblasti III imamo stabilan rad u oblasti visokih napona. Tačka A predstavlja kritičnu tačku stabilnog rada u kolenu karakteristike magnećenja. Tačka B odgovara rezonantnom režimu u kome je induktivna struja jednaka kapacitivnoj struji. Pri naponima višim od ovog u tački B režim postaje induktivan i sa porastom struje gotovo linearno raste i napon.

Jednačina (524) predstavlja centralnu elipsu, čija je poluosa zavisna od struje I . Režim rada kola se dobija u preseku elipse i krive $I_{LC} = |I_C - I_L|$. I u ovom slučaju se javljaju tri tačke preseka. Pošto se tačka M nalazi u stabilnom delu u obla-

sti nižih napona, nazivamo je tačkom stabilnog rada pri niskim naponima. Na potpuno isti način kao i kod redne ferorezonanse, sa povećanjem struje ose elipse se povećavaju i režim se pomera po delu krive OA do tačke A. Ako i dalje povećavamo struju napon naglo raste tako da se režim naglo menja do tačke P. Ovom režimu pri znatno višim naponima odgovaraju i velike struje kroz LC konturu, dok se ukupna struja ne menja.

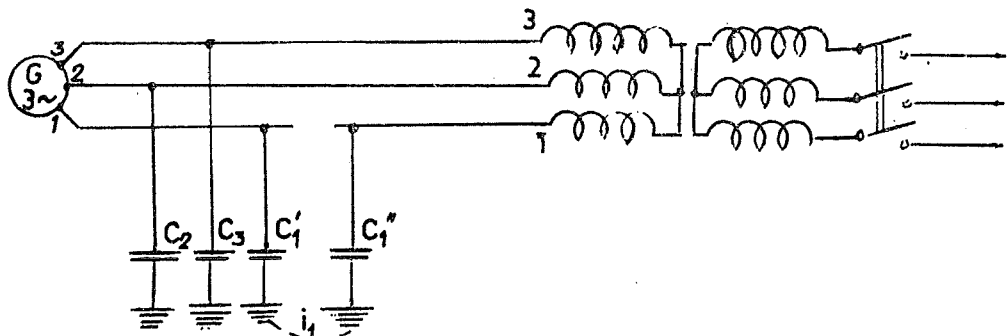
Uslovi za nastanak paralelne ferorezonanse su isti kao i kod redne. Ove dve pojave mogu se na isti način objasniti jer su posledice dualnosti električnih mreža.

3.3 Praktični slučajevi prenapona usled ferorezonanse

Postoji više načina da se u elektroenergetskom sistemu pojave ferorezonanti prenaponi. Nelinearna induktivnost je najčešće induktivnost magnećenja transformatora u praznom hodu mada to može da bude i induktivnost čelične armature kablova, induktivnost naponskih transformatora itd.

Posmatraćemo slučaj naponske ferorezonanse u trofaznoj mreži prilikom prekida jednog od faznih provodnika.

Neka je dat deo elektroenergetskog sistema kao na sl. 180



sl. 180

U slučaju da je došlo do prekida jednog faznog provodnika iako ne postoji galvanska veza u jednoj fazi, struja se zatvara preko kapaciteta C_1' i C_1'' delova voda koji su u prekidu. Ako je transformator na kraju voda neopterećen, imamo kolo u kome može da se pojavi ferorezonansa. U ovom kolu čak postoje i uslovi za promenu faznog reda, u tom slučaju se pojavljuju vrlo visoki prenaponi na transformatoru i na samom mestu prekida. Napon na mestu prekida se deli u odnosu kapaciteta C_1' i C_1'' koji

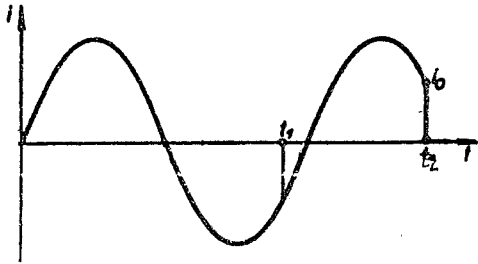
zavise od dužine voda.

4. Isključenje transformatora u praznom hodu

U slučaju da je potrebno izvršiti isključenje malih induktivnih struja magnećenja transformatora prekidačima čije su karakteristike takve da mogu da ugase luk i pre prolaska struje kroz nulu, mogu se pojaviti visoke vrednosti prenapona. Ovi prenaponi su utoliko viši ukoliko je vrednost struje koju prekidač trenutno prekida veća.

Prilikom rastavljanja kontakta prekidača pri isključenju ovih malih struja, prostor između kontakata nije mnogo jonizovan, tako da se električni luk veoma lako gasi. Zbog toga, u ovom slučaju postoji vrlo velika verovatnoća da dodje do gašenja luka pre njenog prolaska kroz nulu.

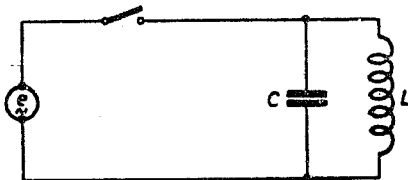
Posmatrajmo promenu struje magnećenja u vremenu.



181

Pošto nagla promena struje sa vrednosti i_0 na 0, kroz induktivnost magnećenja stvara vrlo veliku ems samoindukcije, pri ovom procesu se mogu pojaviti visoki prenaponi.

Veličinu ovih prenapona možemo proceniti na sledeći način: transformator u režimu praznog hoda možemo zameniti njegovim ulaznim kapacitetom C i induktivnošću magnećenja L , kao na sl. 182.



sl.182

U trenutku t_1 , počinju da se razdvajaju kontakti. U trenutku t_2 je razmak kontakata dovoljan, a oduvavanje luka dovoljno intenzivno, da dolazi do trenutnog prekidanja struje i do potpunog gašenja luka.

Ukupna energija pre otvaranja prekidača na inercionim elementima je:

$$W_1 = \frac{1}{2}CU_1^2 + \frac{1}{2}LI_1^2 \quad (525)$$

Prvi član predstavlja e-