



Leopold Brčić, dipl. inž.
Mr. sc. Krešimir Meštrović, dipl. inž.
KONČAR – Institut za elektrotehniku, Zagreb

13-02

SINKRONO SKLAPANJE PRIGUŠNICA

SAŽETAK

Mogućnost upotrebe sinkronog sklapanja sa svrhom ograničavanja sklopnih prenapona proučava se oko 25 godina. Rezultati studija općenito su pokazali da sinkrono sklapanje u principu vrlo učinkovito reducira sklopne prenapone kod nekih primjena. Usporedba sa ostalim metodama kontrole (otpornici, prigušnice i odvodnici prenapona) pokazala je da se sinkronim sklapanjem postižu u najmanju ruku jednaki ili bolji rezultati s obzirom na ograničenje sklopnih prenapona.

Ovaj referat obuhvaća pregled primjena sinkronog sklapanja sa posebnim osvrtom na sinkrono isklapanje prigušnice (induktivnog trošila) kao najinteresantniju mogućnost upotrebe sinkronog sklapanja. Na kraju su dane neke karakteristike i zahtjevi na prekidače za sinkrono sklapanje.

Ključne riječi: sinkrono sklapanje, sklopni prenaponi, prigušnica, prekidač, rezanje struje

SHUNT REACTOR SYNCHRONOUS SWITCHING

ABSTRACT

The feasibility of using synchronous switching to control the generation of switching surges has been studied for approximately 25 years. These studies have generally concluded that synchronous switching in principle can be very effective in reducing switching surges for certain applications. Comparisons have been made to other control schemes, such as opening or closing resistors, inductors and surge arresters. The degree of control possible by use of synchronous switching has ideally been shown to be equal to, or better than that achieved by other control methods.

This article contains the review of applications of synchronous switching with special regard to shunt reactor switching as one of most interesting applications of synchronous switching. Circuit-breaker characteristics, as well as dielectric and mechanical requirements for synchronous switching are given in this article.

Key words: synchronous switching, switching surges, shunt reactor, circuit-breaker, chopping current

1. UVOD

Gotovo sve suvremene konstrukcije visokonaponskih prekidača svode se na lučne aparate. To znači da prilikom prekidanja struje, u trenutku razdvajanja kontakata prekidača, uvijek dolazi do pojave električnog luka. Ukoliko se radi o izmjeničnoj struji, upravo taj el. luk ne dopušta da se struja prekine trenutno (što bi uostalom izazvalo velike prenapone), nego da se prirodno po sinusoidi dovede u nulu. U trenutku kada struja prolazi kroz nulu el. luk se gasi. Međutim, gorenjem el. luka, kod kratkog spoja, razvija se ogromna toplinska energija, pa je vrijeme gorenja el. luka potrebno skratiti što je više moguće.

U početku se smatralo da je moguće principom sinkronog sklapanja eliminirati el. luk otvaranjem kontakata prekidača već u prvoj prirodnoj nul-točki struje nakon isklonpne komande. Međutim, to zahtjeva vrlo veliku mehaničku preciznost i golemu brzinu otvaranja, što u praksi nije moguće realizirati.

Danas pod pojmom "sinkronog sklapanja" smatramo svako sklapanje kod kojeg se "gađa" trenutak uklopa ili isklopa u odnosu na sinusoidu struje ili napona.

Međutim, što se tiče kratkog spoja, moderna rješenja konvencionalnih prekidača povećane pouzdanosti i jedostavnijeg održavanja, s vremenima prekidanja unutar tri poluperiode struje, u potpunosti zadovoljavaju uvjete sa stajališta stabilnosti elektroenergetskog sustava i električke trajnosti. Što više, na današnjem stupnju tehnološkog razvoja prekidača postignuto je gotovo isto ili čak i manje trošenje kontakata u konvencionalnom nego u sinkronom režimu sklapanja. Upravo zbog toga konvencionalni prekidači ne pokazuju neke bitne prednosti pri sinkronom prekidanju struje kratkog spoja.

Sinkrono sklapanje koristi se prvenstveno na visokom, a djelomično i na srednjem naponu. Primjenjuje se za sklapanje prigušnica, motora, transformatora, kondenzatora, dugih vodova i struja kratkog spoja s izraženom istosmjernom komponentom, dakle prvenstveno zbog smanjenja naponskih i strujnih naprezanja, a ne iz razloga trajnosti kontakata.

Glavne prednosti sinkronog sklapanja dolaze do izražaja prilikom sklapanja malih induktivnih i kapacitivnih struja, te uklapanja dugih vodova.

2. PREGLED PRIMJENA

2.1 Sklapanje kapacitivnih trošila

Sklapanje kapacitivnih trošila uvijek se smatralo potencijalnim izvorom štetnih napona i struja. Prilikom uklapanja jedne kondenzatorske baterije u mreži se mogu pojaviti struje veličina i do 5 p.u., frekvencija od 200 do 600 Hz, ovisno o impedanciji izvora, veličini kondenzatorske baterije i konfiguraciji mreže. Ako se uklapaju dvije kondenzatorske baterije spojene paralelno na istu sabirnicu može doći i do 20-100 puta struja većih od nazivne, frekvencija do 20 kHz. Navedeni poremećaji šire se kroz postrojenje oštećujući transformatore, prijenosne vodove kao i elektroničku opremu u postrojenju (mjernu, zaštitnu, komunikacijsku,...).

Kako bi se ograničile velike potezne struje i prenaponi koji se javljaju prilikom uklapanja kondenzatorske baterije, optimalno vrijeme zatvaranja svakog pola bilo bi u nul-točki pogonskog napona. Međutim još je važno naglasiti da vrijeme uklapanja ovisi i o tome je li zvjezdište kondenzatorske baterije uzemljeno ili ne, a sam kondenzator mora biti ispražnjen od preostalog naboja prije samog početka uklapanja.

U slučaju uzemljenog zvjezdišta optimalno vrijeme uklapanja je u trenutku kad fazni napon prolazi kroz nulu za svaki pol, dok kod kondenzatorske baterije sa neuzemljenim zvjezdištem optimalno vrijeme uklapanja ovisi o redosljedu zatvaranja polova.

Za uspješno uklapanje u nul-točki napona, brzina opadanja podnosivog napona međukontaktne razmaka, $u(t)$, mora biti veća od brzine promjene narirutog napona na kontaktnom razmaku, $u_1(t)$, i to neposredno prije nul-točke napona, prema relaciji:

$$\frac{du}{dt} > \frac{d(u_1)}{dt} = \omega U \quad (1)$$

Konvencionalni SF₆ prekidači imaju npr. $du/dt = 40$ kV/ms, a tjemena vrijednost napona U ovisi o načinu uzemljenja nul-točke:

- za kruto uzemljenu kondenzatorsku bateriju $U = U_n \sqrt{2/3}$ za sva tri pola
- za kondenzatorsku bateriju sa izoliranom nul-točkom $U = 0.5 * U_n \sqrt{2}$ za prva dva pola koji uklapaju, odnosno $U = 1.5 * U_n \sqrt{2/3}$ za posljednji pol.

Na osnovu relacije (1) vidi se da konvencionalni SF₆ prekidači mogu uspješno sinkrono uklopiti kondenzatorsku bateriju s kruto uzemljenom nul-točkom ako je pogonski napon < 145 kV/50 Hz, odnosno kondenzatorsku bateriju sa izoliranom nulom ako je pogonski napon < 180 kV/50 Hz.

Pri isklapanju kondenzatorske baterije pojavljuju se povratni naponi vrijednosti 2 p.u. Sinkronim prekidanjem ova se pojava može potpuno izbjeći, ali to nije potrebno jer se moderni visokonaponski vakuumski i SF₆ prekidači i tako deklariraju kao prekidači bez ponovnih paljenja, pa ne postoji potreba za sinkronizacijom.

Na osnovi rezultata studije [1] i prethodno navedenih pretpostavki zaključujemo kako upotreba sinkronog sklapanja može održati sklopna preopterećenja u razumnim granicama. Efikasnost sinkronog sklapanja u ovoj primjeni očito ovisi o karakteristikama prekidača i kontrolnog sustava. Rezultati studije [1], dakle, potvrđuju kako mnogobrojne instalacije za uklapanje kondenzatorskih baterija rade na zadovoljavajući način.

2.2 Sklapanje dugih vodova

Pri sklapanju dalekovoda razlikujemo sklapanje nenabijenog i prethodno nabijenog voda. Optimalno vrijeme za uklapanje nenabijenog (i nepoterećenog) voda je u trenutku kada napon izvora prolazi kroz nulu. U tom trenutku je i napon na sklopnom aparatu jednak nuli. U slučaju uklapanja prethodno nabijenog voda, u trenutku uklapanja napon na sklopnom aparatu, također, mora biti jednak nuli. To zahtjeva mjerenja sa obje strane sklopnog aparata, te složeno upravljanje sustavom.

Ukoliko vod na svome slobodnom kraju nema spojen odvodnik prenapona, u oba navedena slučaja dolazi do generiranja prenapona na neopterećenom kraju voda. Ako je vod sa obje strane spojen na odvodnike prenapona maksimalni prenaponi pojavljuju se na sredini voda. Apsolutni iznosi tih prenapona su, naravno, manji nego kod voda bez odvodnika na otvorenom kraju.

Posebne prednosti sinkronog sklapanja pokazuju se za nekompenzirane vodove sa automatskim ponovnim uključivanjem, ukoliko je poznat polaritet preostalog naboja kako bi se mogao pravilno odrediti trenutak uklapanja. Sinkrono ponovno uklapanje treba vršiti kada je napon na prekidaču razmjerno malen. To, ipak, može biti komplicirano zbog oscilacija frekvencije i samim time nesigurnog određivanja trenutka kada je napon na prekidaču nula. Procjena slijedećeg nultog napona vrši se na osnovu prethodnog prolaska napona kroz nulu, kako bi uklopili baš u tom trenutku. Ovime se ostvaruje značajno smanjenje prenapona.

Primjena sinkronog sklapanja kod isklapanja voda nužna je za sklopne aparate koji nemaju mogućnost opiranja visokom povratnom naponu koji se pojavljuje između kontakata nakon isklapanja.

2.3 Sklapanje struje greške

Da bi se minimizirala energija luka potrebno je minimizirati vrijeme trajanja luka prilikom otvaranja kontakata i na taj način povećati trajnost kontakata, produžiti period između revizija i smanjiti troškove održavanja.

Optimalno vrijeme za isklapanje struje greške je u trenutku prolaska struje kroz nulu. To znači da se kontakti trebaju početi razmicati prije prolaska struje kroz nulu, tj. trebalo bi predvidjeti u kojem trenutku će struja proći kroz nulu. Budući da je struja greške nesimetrična, a ovisi i o trenutku nastanka kvara (kratkog spoja), određivanje trenutka u kojem bi struja trebala proći kroz nulu predstavljalo bi problem. Pretpostavljajući da nesimetrija u struji ne postoji u trenutku isklapanja, tada bi se trenutak isklapanja mogao odrediti mjereći samo napon. U svakom slučaju optimalno vrijeme za isklapanje potrebno je posebno odrediti za svaki sklopni aparat.

2.4 Sklapanje induktivnih trošila

Kako će o ovoj primjeni sinkronog sklapanja više biti riječi u slijedećem poglavlju, potrebno je zasad istaći samo činjenicu da prekidanje struje prilikom isklapanja uzrokuje visoke prenapone koje je potrebno ograničiti kako ne bi došlo do ponovnog paljenja luka u aparatu.

2.5 Sklapanje transformatora

Najkritičniji parametar pri ovoj vrsti sklapanja je struja uklapanja transformatora. U nekim slučajevima struja uklapanja može dosegnuti vrijednosti struja kratkog spoja. To može uzrokovati nepravilnosti u radu zaštite i dovesti do pogrešnog sklapanja. Prema tome, u ovakvim je slučajevima potrebno poduzeti određene mjere kako bi se smanjila veličina struje uklapanja.

Glavni parametri što utječu na veličinu struje uklapanja jesu krivulja zasićenja transformatora, impedancija kratkog spoja i remanentni magnetski tok u transformatorskoj jezgri u trenutku uklapanja. Ekvivalentna mrežna impedancija kratkog spoja, unatoč činjenici da je obično nižeg reda od impedancije kratkog spoja transformatora, također utječe na struju uklapanja.

Optimalna kontrola uklapanja i isklapanja, za svaki pol, ovisi o vrsti spoja transformatora. Budući da se ne traži velika točnost može se upotrijebiti jedan operacijski mehanizam sa ugrađenim mehaničkim kašnjenjem između polova. Međutim, optimalno vrijeme uklapanja ovisi i o remanentnom magnetizmu koji je preostao u jezgri transformatora od prethodnog isklapanja. Ako nije moguće točno odrediti vrijednost remanencije može se pretpostaviti neka fiksna vrijednost i sa njom podesiti parametre sinkronog uklapanja. Ne uzimajući u obzir utjecaj remanencije, točnost uklapanja od ± 2 ms ili manja, trebala bi reducirati veličinu prijelazne struje na trećinu vrijednosti dobivene bez sinkronog uklapanja.

3. SINKRONO SKLAPANJE PRIGUŠNICA

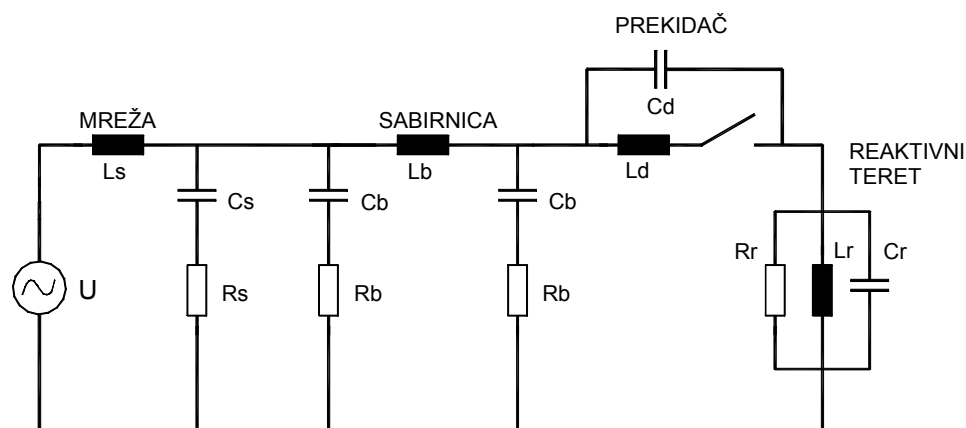
3.1 Uklapanje prigušnice

Da bi se izbjegla velika potezna struja ili visoka istosmjerna komponenta prilikom uklapanja, induktivna trošila moraju se priključiti na mrežu u trenutku tjemene vrijednosti pogonskog napona. U slučaju jednofaznih trošila radi se o tjemenoj vrijednosti faznog napona, a u slučaju trofaznih trošila trenutak uklapanja ovisi o izvedbi jezgre, namota i načinu uzemljenja nul-točke.

3.2 Isklapanje prigušnice

Prilikom prekidanja malih induktivnih struja (slika 1.), ako se gašenje el. luka desi na malom razmaku kontakata, vrlo često nastaje ponovno paljenje. Naime, zbog velike strmine napona na strani tereta, a time i velike strmine povratnog napona, mali kontaktni razmak još je uvijek neoporavljen i nije kadar podnijeti visoki povratni napon. Kako zbog male energije el. luka može doći i do rezanja struje, to stvara još veće napone na teretu i veće povratne napone, pa se povećava mogućnost ponovnog paljenja el. luka. Mjerenja pokazuju da je napon koji se pojavljuje kao rezultat ponovnog paljenja el. luka kod aparata sa tendencijom rezanja struje između 2 i 2.5 p.u.

Sama amplituda prenapona nije štetna za prigušnicu ili VN sistem, ali brzina promjene prenapona može oštetiti izolaciju prigušnice, motora ili npr. prvih zavoja transformatora. Ova velika dielektrička naprezanja mogu se izbjeći samo ukoliko se izbjegne prvo ponovno paljenje. U praksi je to moguće izvesti jedino sinkronizacijom trenutka razdvajanja kontakata svakog pola prekidača u odnosu na nulu struje, tako da gašenje el. luka nastane na dovoljnom razmaku kontakata.



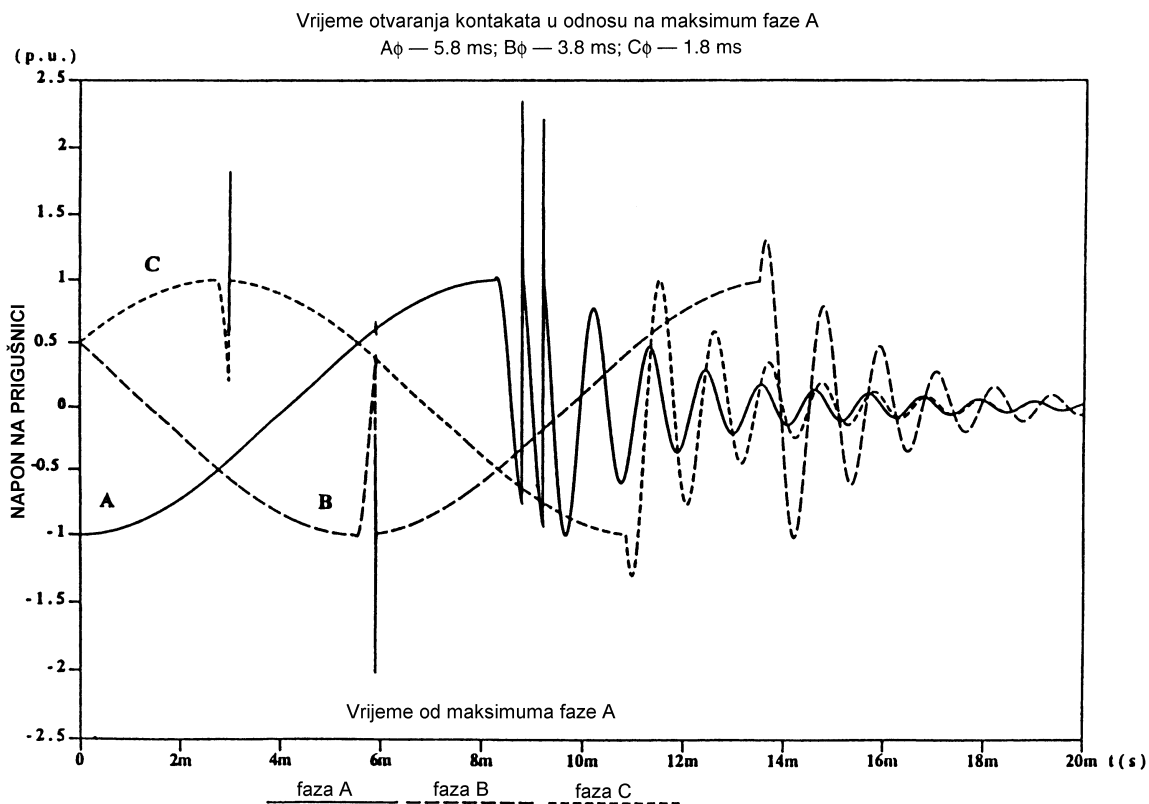
Slika 1. Shema isklapanja prigušnice

Tablica I. zorno prikazuje prednosti sinkronog sklapanja nad nekontroliranim sklapanjem. Iz tablice je vidljivo kako su kod sinkronog sklapanja znatno manji prenaponi na prigušnici i vremena trajanja el. luka i kako nema ponovnog paljenja luka. To svakako pogoduje produljenju životne dobi sklopnog aparata, a i povećanoj sigurnosti i pouzdanosti daljnje upotrebe.

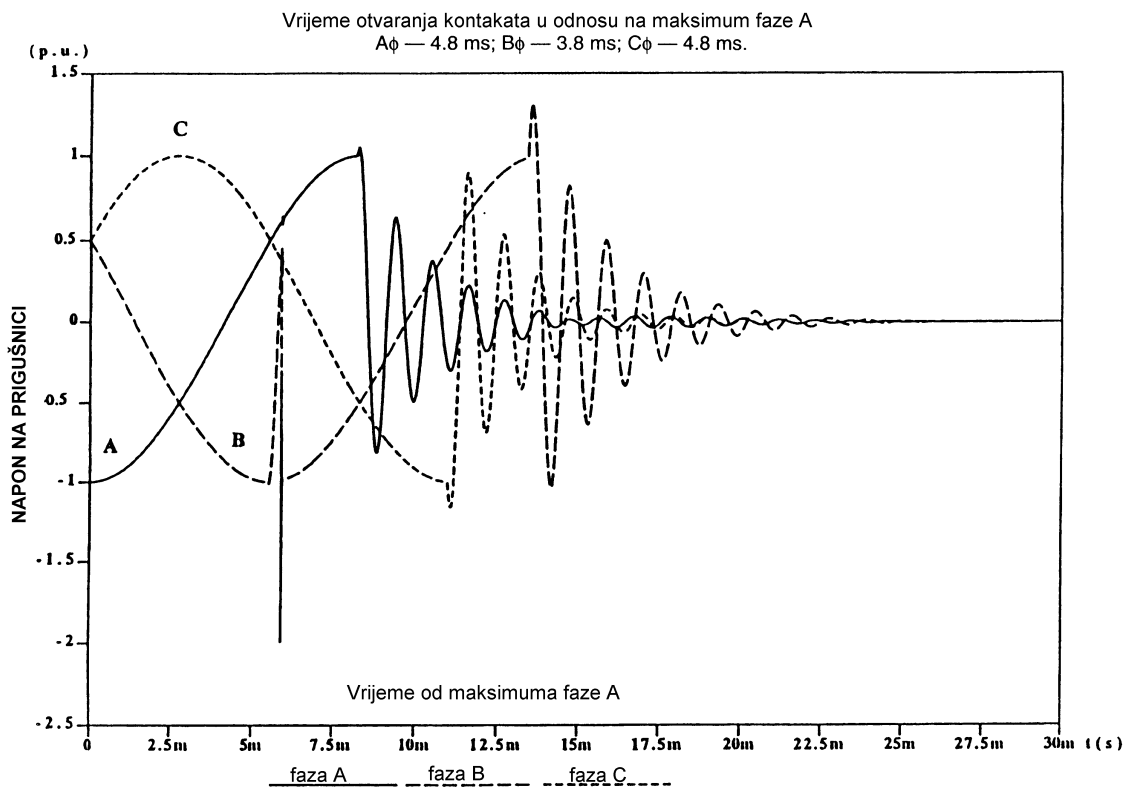
Tablica I. Performanse nekontroliranog i sinkronog sklapanja

	Max. napon na prigušnici, p.u.	Vrijeme razdvajanja kontakata, ms			Vrijeme trajanja luka, ms			Napon ponovnog paljenja luka, kV		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
nekontrolirano sklapanje	2.4	5.81	3.8	2.8	10.8	10.1	9.3	1450	1220	1100
sinkrono sklapanje sa simultanim polovima	2.0	5.8	3.8	3.8	2.5	10.1	7.3	-	1220	-
sinkrono sklapanje sa stupnjevanim polovima	1.1	3.8	9.4	6.6	4.5	4.5	4.5	-	-	-

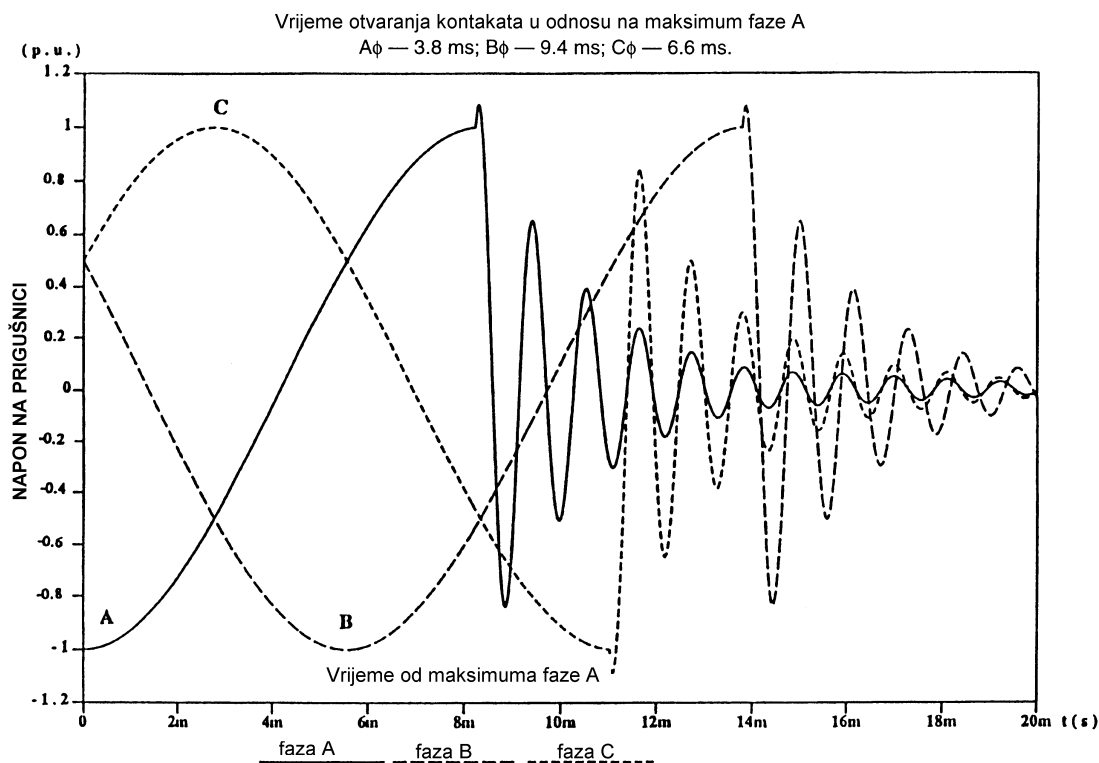
Na slikama 2., 3. i 4. prikazani su oscilogrami nekontroliranog isklapanja prigušnice, te isklapanja sa simultanim i stupnjevanim otvaranjem polova. Tu se ponovno vidi kako sinkrono isklapanje značajno smanjuje generirane prenapone koji bi mogli oštetiti izolaciju prigušnice.



Slika 2. Oscilogram nekontroliranog isklapanja prigušnice, [1]

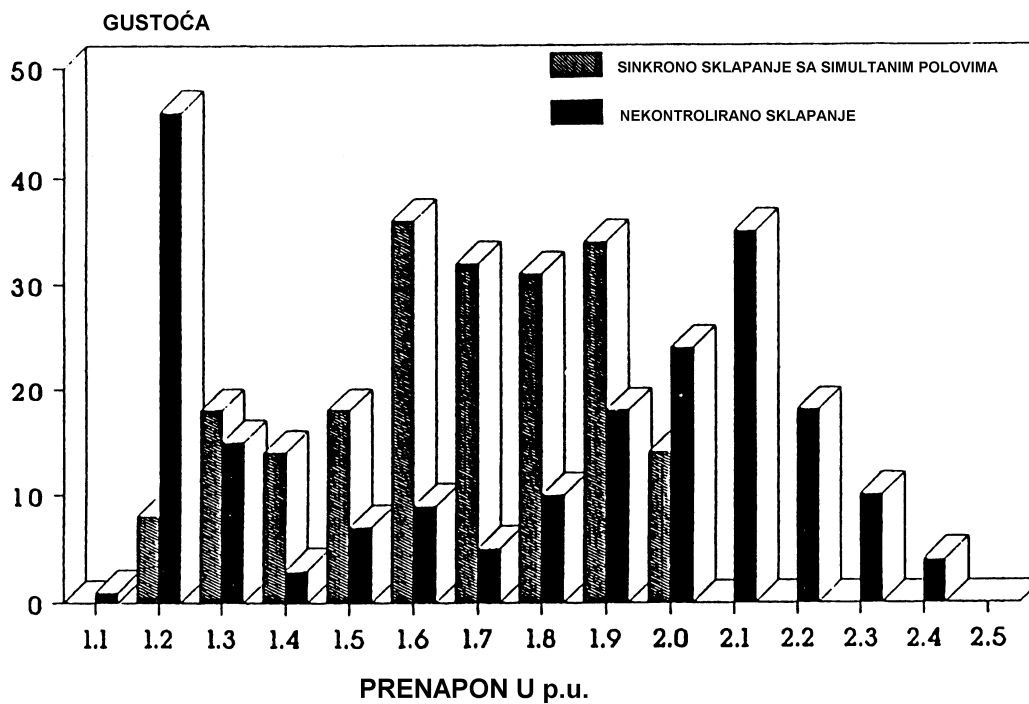


Slika 3. Oscilogram sinkronog isklapanja prigušnice sa simultanim polovima, [1]



Slika 4. Oscilogram sinkronog isklapanja prigušnice sa stupnjevanim polovima, [1]

Rezultati studije [1] sumirani su u histogram napona prema slici 5. Vidi se da se kod sinkronog isklapanja češće javljaju prenaponi amplituda 1.4 do 1.9 p.u. nego kod nekontroliranog isklapanja, ali se uopće ne javljaju prenaponi amplituda većih od 2 p.u., koji su dosta česti kod nekontroliranog isklapanja.



Slika 5. Histogram prenapona za nekontrolirano i sinkrono isklapanje prigušnice, [1]

Sinkrona kontrola prilikom isklapanja prigušnice (induktivnog trošila) s ciljem smanjenja prenapona može se ostvariti vrlo jednostavno. Stupanj kontrole ne ovisi toliko o amplitudi prenapona, struji kroz prigušnicu prilikom razdvajanja kontakata ili o načinu uzemljenja prigušnice koliko o karakteristikama sklopnog aparata (vrijeme razmicanja kontakata, dielektrična čvrstoća i sl.). Najvjerojatnije da bi točnost od 1 do 2 ms bila prihvatljiva za ovu svrhu.

Ako se zahtjeva sinkrono uklapanje prigušnica radi smanjenja prijelaznih struja, optimalno vrijeme za zatvaranje kontakata je u trenutku maksimuma napona na otvorenim kontaktima. Točnost od 1 do 2 ms ograničila bi faznu prekostruju na oko 1.5 p.u., a struju prema zemlji na oko 0.5 p.u.

Optimalno vrijeme za uklapanje i isklapanje ovisi i o načinu uzemljenja prigušnice i sistema.

Poželjno je kontrolirati svaki pol neovisno, no budući da se ne traži znatnija točnost može se koristiti i sklopni aparat sa samo jednim operacijskim mehanizmom s ugrađenim mehaničkim sistemom za kašnjenje.

4. SINKRONI PREKIDAČ

Uređaj za sinkrono sklapanje sastoji se od konvencionalnog prekidača opremljenog sa elektronskim kontrolnim modulom. Na bazi informacija iz različitih senzora kontrolni modul konvertira originalni operacijski signal u signal za sinkrono sklapanje.

To se postiže odgovarajućim vremenom kašnjenja, koje se određuje na temelju podataka o trenutnoj vrijednosti napona na obje strane prekidača, struji kroz prekidač i vremenu mehaničke operacije. Dodatni parametri kao što su temperatura okoline, upravljački napon i tlak plina, mogu također biti uključeni.

Elektronski modul i senzori integrirani su u prekidač, pa se takav inteligentni prekidački sustav može tretirati potpuno jednako kao i konvencionalni prekidač i ne zahtjeva dodatne instalacijske troškove, kao ni specijalne kontrolne krugove.

Osnovni zahtjev kod sinkronog sklapanja je precizno poznavanje sklopnih vremena prekidača. Ovaj parametar nije konstantna veličina čak niti kod najmodernijih prekidača. Iako odstupanja leže unutar dozvoljenih 1 ms, utjecaj ostalih parametara kao što su niske temperature, tlak plina, te prepaljenje el. luka mogu dovesti do odstupanja u rasponu od nekoliko milisekundi, čime se praktički gube svi pozitivni efekti sinkronog sklapanja.

Najvažnija karakteristika sklopnog aparata namijenjenog za sinkrono sklapanje je dielektrička sposobnost prekidne komore. Ako se sinkrono sklapanje postiže uklapanjem u trenutku nul-točke napona (npr. kod uklapanja kondenzatorske baterije) potrebno je da dielektrična čvrstoća između kontakata bude u svakom trenutku veća od trenutne vrijednosti napona između kontakata.

Što se tiče mehaničkih zahtjeva na prekidač treba reći kako proizvodnja modernih SF₆ prekidača pokazuje da je moguće načiniti takav pogonski mehanizam kojim bi se postigla točnost sklapanja unutar ± 1 ms. Međutim, nekoliko izvještaja je pokazalo da se ova točnost ne bi mogla održati kroz jedan duži period u ekstremnim vremenskim uvjetima (npr. niske temperature). Zbog toga se predlaže tolerancija od 2 do 3 ms. U nekim je, pak, primjenama potrebno razdvojiti pogonske sisteme svakog pola da bi se postigla zahtjevana kontrola sklapanja. Većina prekidača je opremljena sa tri mehanizma, pa to ne predstavlja problem. Kod nekih primjena lakše je upotrijebiti samo jedan pogonski mehanizam i njemu dodati odgovarajuće vremensko kašnjenje između polova.

5. ZAKLJUČAK

Iako se sinkrono sklapanje već koristi u raznim aplikacijama, smatra se da njegovo vrijeme tek dolazi. Prvenstvena namjena sinkronog sklapanja jest smanjenje strujnih i naponskih naprezanja, dok je mogućnost povećanja trajnosti kontakata u drugom planu.

Pri razmatranju upotrebe sinkronog sklapanja mora se uzeti u obzir i ekonomski aspekt, bilo direktni ili indirektni. Direktni utjecaj podrazumijeva poboljšanje u ograničenju prenapona i prekostruja u mreži, dok indirektni utjecaj predstavlja uštedu u opremi zbog smanjenih naprezanja. Za procjenu indirektnih utjecaja na mrežu treba uzeti u obzir npr. smanjenje nivoa izolacije zbog reduciranih prenapona kao i manje troškove održavanja opreme za cijeli životni vijek. U slučajevima kad primjena sinkronog sklapanja dovodi do eliminacije skupih otpornika, ZnO odvodnika prenapona i prekidačkih jedinica ušteda je očita.

Napredak u tehnologiji prekidača kombiniran sa vrlo sofisticiranom integriranom elektronikom dodatno govori u prilog sinkronom sklapanju. Na osnovu svega dosad navedenog da se naslutiti da će postepeno, ali sigurno sinkrono sklapanje istisnuti nekontrolirano, kako zbog svojih tehničkih, tako i ekonomskih prednosti.

U Tablici II. sumirani su učinci sinkronog uklapanja i isklapanja prigušnice. Prednosti koje pruža sinkrono sklapanje najbolje se očituju u smanjenju prenapona pri uklapanju sa nekih 2 – 2.5 p.u. na svega 1.2 p.u. i sprečavanju ponovnog paljenja el. luka pri isklapanju.

Tablica II. Učinci sinkronog uklapanja i isklapanja prigušnice, [1]

	uklapanje prigušnice	isklapanje prigušnice
ograničenje prenapona (optimalno postignuto)	<u>napon</u> : 1.2 p.u. <u>struja</u> : smanjenje DC komponente potezne struje uklapanjem prigušnice bez jezgre ili sa željeznom jezgrom	<u>napon</u> : nema pojave prenapona zbog ponovnog paljenja luka, prenaponi uslijed rezanja struje mogu se minimizirati <u>struja</u> : nevažan parametar
minimizacija smetnji kod industrijskog napona	da	da
optimalna kontrolna točka (teoretski)	Za kontrolu potezne struje: 1., 2. i 3. faza: <u>50 Hz</u> 1.67 ms – 5.0 ms – 8.33 ms nakon nule napona <u>60 Hz</u> 1.39 ms – 4.17 ms – 6.85 ms nakon nule napona	da bi se izbjeglo ponovno paljenje el. luka: 5 – 7 ms prije nule struje
potrebni vremenski prozor	+ / - 2.3 ms	+ / - 1-2 ms
nadgledanje parametara sustava	napon izvora	napon izvora, struja
posljedice pogreške kontrolnog sustava	potezna struja prema zemlji, velik sadržaj viših harmonika	može doći do ponovnog paljenja el. luka
pomoćne mjere	nema	upotreba otpornika za isklapanje
konvencionalna metoda		upotreba otpornika za isklapanje ili odvodnika prenapona

LITERATURA

- [1] "Controlled switching – a state-of-the-art survey", Task Force 13.00.1 of Study Committee 13, ELECTRA, No. 162, October 1995.
- [2] Meštrović, K.: "Sklopni aparati srednjeg i visokog napona", Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, 1998.
- [3] B. J. Ware, J. G. Reckleff, G. Mauthe, G. Schett: "Synchronous switching of power systems", CIGRE Session 1990. report 13-205
- [4] A. Holm, R. Alvinsson, U. Akesson, O. Karlen: "Development of controlled switching of reactors, capacitors, transformers and lines", CIGRE Session 1990., report 13-201
- [5] E. Andersen, S. Berneryd, S. Lindahl: "Synchronous switching of shunt reactor and shunt capacitors", CIGRE Session 1998., report 13-12