

Slaven Nekić, dipl. ing.  
mr. sc. Krešimir Meštrović, dipl. ing.  
mr. sc. Davor Petranović, dipl. ing.  
KONČAR – Institut za elektrotehniku

## SUPRAVODLJIVI OGRANIČAVAČI STRUJE KVARA

### SAŽETAK

U referatu je prikazan pregled supravodljivih uređaja za ograničavanje struje kvara koji su još u fazi istraživanja ili razvoja. Objasnjeni su principi rada, mogućnosti izvedbe, kao i prednosti i nedostaci različitih konцепција.

**Ključne riječi:** supravodljivost, ograničavač struje kvara, struja kratkog spoja, visokotemperaturni supravodič

## SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS

### SUMMARY

This paper presents an overview of superconducting fault current limiting devices which are still in a research or development stage. Operation principles and design possibilities, as well as advantages and disadvantages of different concepts, are explained.

**Key words:** superconductivity, fault current limiter, short circuit current, high temperature superconductor

### 1. UVOD

Supravodljivost u živi (ispod 4.2 K) otkrio je još 1911. godine H. Kamerlingh Onnes. Danas je poznato više od 100 različitih supravodiča. Izuzetna električna svojstva supravodiča su:

- nepostojanje otpora ispod kritične temperature ( $T_c$ ) i kritične gustoće struje ( $j_c$ )
- čim se vrijednosti  $j_c$  i/ili  $T_c$  povećaju, otpor materijala drastično se povećava

Većina konceptacija ograničavača struje kvara zasnovanih na visokotemperaturnoj supravodljivosti iskorištava taj oštri prijelaz supravodiča iz stanja nepostojanja otpora pri nazivnim strujama u stanje konačnog otpora pri većim gustoćama struje. Struje kvara su radi toga trenutno ograničene kad se prijeđe kritična struja. Zbog ovakvih se osobina supravodljivi ograničavač struje kvara približava ponašanju "idealnog" ograničavača struje kvara, samookidajućeg, neotkazivog uređaja (gubitak supravodljivosti dovodi do unošenja velike impedancije u sustav).

Glavni nedostatci supravodiča su:

- potreba za hlađenjem koje je dosta skupo
- Supravodiči su skloni razvoju termičkih nestabilnosti (tzv. najtoplijih točaka; eng. hot spots). Kako bi se materijali zaštitili od takvih najtoplijih točaka često se primjenjuje obična vodljiva premosnica.
- izmjenične struje uzrokuju tzv. izmjenične gubitke koji povećavaju troškove hlađenja

## 2. MATERIJALI

### 2.1. Niskotemperaturni supravodiči (LTS – Low Temperature Superconductors)

"Klasični" metalni supravodiči imaju prijelazne temperature ispod 25 K, zbog čega ih nazivaju niskotemperaturnim supravodičima (LTS). LTS žice komercijalni su proizvod već mnogo godina, sa svojstvima koja ih čine prikladnim za primjene kod ograničavača struje kvara (visoka matrična otpornost, mali izmjenični gubici). U skladu s tim napravljen je nekoliko prototipova na osnovi LTS materijala. Međutim, zbog niske radne temperature (materijal se obično hlađi tekućim helijem na 4.2 K), troškovi hlađenja su iznimno visoki te se ne očekuje komercijalizacija ograničavača struje kvara zasnovanih na LTS tehnologiji. Kao posljedica toga zapravo je obustavljen razvoj LTS ograničavača struje kvara nakon otkrića visokotemperaturnih supravodiča.

### 2.2. Visokotemperaturni supravodiči (HTS – High Temperature Superconductors)

1986. godine otkrivena je nova vrsta supravodiča. Zbog njihovih relativno visokih prijelaznih temperatura nazvani su visokotemperaturni supravodiči (HTS). Visokotemperaturna supravodljivost jedan je od najvećih znanstvenih pronađazaka 20-og stoljeća za čije su otkriće J. Bednorz i K. Müller 1987. godine dobili Nobelovu nagradu za fiziku. HTS materijali zasnovani su na keramici od bakrenog oksida i imaju kritične temperature do 135 K. Radi toga, većina HTS materijala može funkcionirati u tekućem dušiku (77 K) što dovodi do značajnog smanjenja troškova hlađenja. Osim toga, sustavi hlađenja zasnovani na tekućem dušiku daleko su jednostavniji od sustava s tekućim helijem. Izbor najvažnijih HTS materijala dan je u tablici I.

Tablica I. HTS materijali

grupa	materijal	kratica	T <sub>c</sub>
La-Cuprate	La(Sr,Ba)CuO		< 40 K
RE-Cuprate	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-δ</sub>	YBCO	92 K
Bi-Cuprate	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Bi2212	94 K
	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	Bi2223	110 K
Tl-Cuprate	Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	Tl2223	125 K
Hg-Cuprate	HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8+δ</sub>	Hg1223	133 K

Najnapredniji materijali sa stanovišta industrijskih primjena su RE- i Bi-Cuprates (Tl- i Hg-Cuprates se manje koriste budući da su otrovni). HTS materijali mogu se proizvesti kao masa (polikristalna ili monokristalna), tanki filmovi (na podlogama) ili žice (trake). Za elektroenergetske primjene uglavnom se u obzir uzimaju Bi2223 žice, Bi2212 masa i YBCO filmovi (fleksibilne YBCO trake još nisu dostupne u većim količinama). Danas je razvoj HTS materijala usmjeren prema postizanju veće kritične gustoće struje ( $j_c$ ), a ne tako mnogo prema postizanju više kritične temperature ( $T_c$ ). Viša  $T_c$  ne donosi mnogo prednosti, dok rad na sobnoj temperaturi ne postane moguć, što nije slučaj. Danas se uglavnom razvijaju dvije vrste materijala:

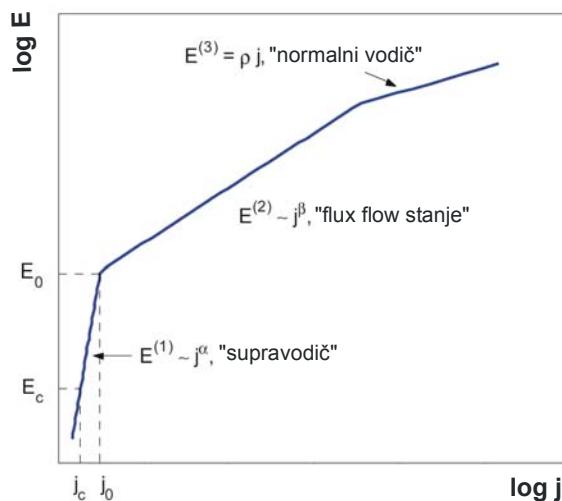
- Poli-kristalni materijal, kao što je BSCCO, s relativno niskom kritičnom gustoćom struje od  $10^3$  do  $10^4$  A/cm<sup>2</sup> proizvodi se kao masa ili debeli film, kako bi mogao voditi veliku nazivnu struju. Zbog velikog poprečnog presjeka supravodljivog materijala dužina vodiča, a tako i potrošnja materijala, vrlo je velika, kako bi se postigla dovoljna ograničavačka impedancija u slučaju kvara.
- Mono-kristalni materijal, kao što je YBCO, ima veliku kritičnu gustoću struje do  $2.5 \cdot 10^6$  A/cm<sup>2</sup> te može voditi velike nazivne struje proizveden kao tanki film μm-ske debljine. Zbog

malog poprečnog presjeka supravodiča dužina potrebna za ograničavačku impedanciju puno je manja.

Sa stanovišta sustava upotreba YBCO tankog filma nudi prednost s obzirom da je vršna propuštena struja u rasponu od 2 do  $3 \cdot I_n$ , a ograničena struja od 0.1 do  $1 \cdot I_n$ , dok je kod upotrebe BSCCO mase ili debelog filma vršna propuštena struja od 10 do  $15 \cdot I_n$ , a ograničena struja od 3 do  $7 \cdot I_n$ .

Osim samog supravodiča sustav za hlađenje je dio koji najviše utječe na konačnu cijenu visokotemperaturnog supravodljivog ograničavača struje kvara. Dok je cijena kriostata određena volumenom supravodiča, veličina pa tako i cijena hladnjaka ovisi o gubicima sustava s doprinosima iz kriostata i strujnih izvoda te o izmjeničnim gubicima. Za YBCO tanke filmove izmjenični gubici su zanemarivi što dovodi do znatno manjih ukupnih gubitaka te na taj način manjih investicijskih i pogonskih troškova.

Najvažnije fizikalno svojstvo ključno za ograničavačko djelovanje supravodljivog ograničavača struje kvara je  $E(j)$  karakteristika visokotemperaturnog supravodiča i njezina ovisnost o temperaturi.  $E(j)$  karakteristika se može podijeliti na tri područja i u skladu s tim parametrizirati kako je prikazano na slici 1. Za masivne Bi2212 vodiće parametri  $j_c = j(E_c = 1 \mu\text{V}/\text{cm})$ ,  $E_0$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  kod 77 K ovise o načinu obrade materijala i u slijedećem su rasponu:  $1000 \leq j_c \leq 10000 \text{ A}/\text{cm}^2$ ,  $0.1 \leq E_0 \leq 10 \text{ mV}/\text{cm}$ ,  $100 \leq \rho \leq 2000 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $5 \leq \alpha \leq 15$ ,  $2 \leq \beta \leq 4$ .



Slika 1. Strujno–naponska karakteristika visokotemperaturnog supravodiča

### 3. RAZLIČITE MOGUĆNOSTI IZVEDBE

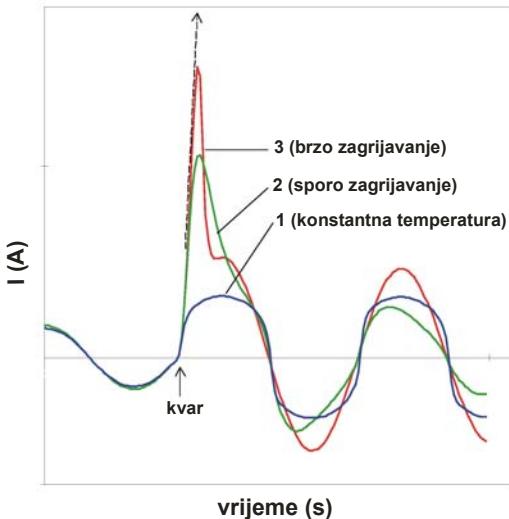
Supravodljivi ograničavač struje kvara može biti izведен prema različitim kriterijima kao što su: ograničavačko djelovanje (npr. faktor ograničavanja, koji je omjer između prve vršne vrijednosti ograničene struje i  $\sqrt{2} \cdot I_n$ ); maksimalno vrijeme ograničavanja prije nego struja kratkog spoja mora biti prekinuta; minimalno vrijeme oporavka prije mogućeg ponovnog ograničavanja; gubici i mogućnost preopterećenja.

#### 3.1. Ograničavačko djelovanje

Ograničavačko djelovanje ovisi uglavnom o  $j_c$  visokotemperaturnog supravodiča, o premosnicu, i posebno o dužini sklopa. Tri u načelu različita ograničavačka djelovanja mogu se dobiti mijenjanjem samo dužine sklopa.

Korištenjem vrlo dugog vodiča električno polje  $E$ , kojem je visokotemperaturni supravodič izložen za vrijeme kvara, je vrlo malo. Na taj način odgovarajuća gustoća struje samo neznatno prelazi nazivnu vrijednost. Gustoća snage  $E \cdot j$  koja se disipira u visokotemperaturnom supravodiču vrlo je mala, tako da se materijal u osnovi ne zagrijava prihv sto ms (krivulja 1 na slici 2). Ova izvedba s "konstantnom temperaturom" rezultira vrlo dobrom ograničavanjem. Međutim, potrebeni dugi vodič je nedopustivo skup. Dodatno tzv. izmjenični gubici koji nastaju kod izmjeničnih primjena mogu biti nedopustivo veliki.

Izvedba druge krajnosti bila bi upotreba vrlo kratkog vodiča, što dovodi do relativno velikog E za vrijeme kvara. Kod nastanka kvara, struja u početku raste neograničena malim otporom u "flux-flow" stanju, već samo impedancijom elektroenergetskog sustava. Međutim, zbog vrlo velike E-j disipirane u visokotemperaturnom supravodiču, materijal se brzo zagrijava i nakon nekoliko stotina  $\mu$ s postaje normalno vodljiv i tako ograničava  $I_{sc}$  (struja kratkog spoja) na približno nazivnu vrijednost (krivulja 3 na slici 2). Ova izvedba s "brzim zagrijavanjem" treba vrlo malu količinu visokotemperaturno supravodljivog materijala. Međutim, iznos prve vršne vrijednosti još uvijek jako ovisi o  $I_{pf}$  (očekivana struja kvara). Nadalje, mogu nastati veliki prenaponi uslijed naglog smanjenja struje uzrokovanih brzim prijelazom u normalno vodljivo stanje. Posljednje, ali ne i najmanje važno, veliki iznos E-j za vrijeme kvara može dovesti do oštećenja visokotemperaturnog supravodiča.



Slika 2. Različita ograničavačka djelovanja dobivena mijenjanjem dužine vodiča (simulacija s očekivanom strujom kvara,  $I_{pf} > 50 \cdot I_n$ )

Korištenje vodiča srednje dužine dovodi do srednjeg iznosa gustoće energije disipirane u visokotemperaturnom supravodiču. U prvih 10 ms maksimum struje kratkog spoja je ograničen na iznos od nekoliko ( $5 \div 10$ )  $I_n$ . Visokotemperaturni supravodič se zagrijava i nakon nekoliko desetaka ms postaje normalno vodljiv (izvedba sa "sporim zagrijavanjem", krivulja 2 na slici 2).

### 3.2. Vrijeme ograničavanja

Budući da se za vrijeme kvara zagrijava sklop visokotemperaturnog supravodiča struja kratkog spoja mora biti prekinuta nakon određenog vremena, kako bi se izbjeglo termičko oštećenje. To maksimalno vrijeme ograničavanja, koje je određeno maksimalnom dopuštenom temperaturom visokotemperaturnog supravodiča, ovisi o ukupnoj termičkoj masi sklopa (određenoj uglavnom dužinom supravodiča) i hlađenju. Ako je struja ograničena na  $3 \cdot I_n$ , sklop visokotemperaturnog supravodiča bit će zagrijavan izuzetno velikom snagom 3 puta većom od nazivne. Porast temperature od oko 100 K može se prihvati. Na taj način mogu se ostvariti vremena ograničavanja između nekoliko desetaka ms i nekoliko sekundi.

### 3.3. Vrijeme oporavka

Druge važne obilježje supravodljivog ograničavača struje kvara je vrijeme nakon kojeg ograničavač može ponovno djelovati, tj. tzv. "vrijeme oporavka". To vrijeme ovisi o termičkoj masi sklopa, otporu premosnice i vremenu ograničavanja. Također ovisi o postotku  $I_h$  kojim će uređaj biti opterećen odmah nakon kvara. Obično je vrijeme oporavka reda veličine nekoliko sekundi.

Međutim, supravodljivi ograničavač struje kvara može biti izведен tako da može ponovno djelovati odmah nakon ograničavanja, tj. s vremenom oporavka jednakim nuli. Postoje dva koncepta: Prvi, tzv. izvedba s konstantnom temperaturom kod koje visokotemperaturni supravodič za vrijeme ograničavanja u biti ostaje na konstantnoj temperaturi te na taj način u supravodljivom stanju. Drugi

koncept, tzv. "pogonsko oporavljanje" može biti primijenjen, ako se zagrijana visokotemperaturno supravodljiva komponenta može oporaviti do svog supravodljivog stanja pod nazivnom strujom  $I_n$ . Prvi koncept treba vrlo veliku termičku masu (vrlo dugi supravodič). Za drugi koncept ključna je vrlo dobra premosnica i optimirano odvođenje topline iz komponente supravodljivog ograničavača struje kvara.

### 3.4. Gubici

Toplina nastala na niskoj temperaturi mora biti odvedena putem sustava za hlađenje. Što su ti gubici veći, veći su i troškovi hlađenja.

Gubici potječu iz tri izvora. Prvi, toplinska vodljivost stijenki kriostatske posude. Drugi, strujni izvodi, spajanje visokotemperaturnog supravodiča s običnim vodičem na sobnoj temperaturi. Treći, kod izmjeničnih primjena izmjenično magnetsko polje uzrokovat će tzv. izmjenične gubitke u visokotemperaturnom supravodiču, tj. materijal nema otpor sasvim jednak nuli za izmjenične aplikacije. Kao u običnim vodičima, izmjenični gubici mogu se smanjiti smanjivanjem dimenzija vodiča. Ukupni gubici supravodljivog ograničavača struje kvara, koji su u osnovi jednaki snazi potrebnoj za pogon sustava za hlađenje, bit će reda veličine  $0.01 \div 0.1\%$  nazivne snage. Oni će biti manji za visokonaponske nego za srednjenačunske primjene zbog smanjenih gubitaka u strujnim izvodima.

### 3.5. Mogućnost preopterećenja

Većina konvencionalnih uređaja u elektroenergetskom sustavu dopušta određenu mogućnost preopterećenja na račun povećanih gubitaka i ubrzanog starenja.

Kod optimalnih izvedbi,  $I_n$  supravodljivog ograničavača struje kvara bit će tek ispod kritične struje (kod nazivne radne temperature) visokotemperaturnog supravodiča. Postoje dva načina koja omogućuju rad iznad  $I_n$ . Prvi, primjena dobre vodljive premosnice omogućit će normalan pogon uređaja  $10 \div 20\%$  iznad  $I_n$ . Drugi, smanjivanjem radne temperature porast će kritična struja te se na taj način nazivna struja može povećati za isti faktor. U oba slučaja preopterećivanje će biti na račun povećanih gubitaka. U drugom slučaju sustavu za hlađenje potrebno je određeno vrijeme da smanji temperaturu, međutim, može se ostvariti veliko preopterećenje čak faktora 2.

### 3.6. Prijelazne pojave

U slučaju prijelaznih preopterećenja djelovanje supravodljivog ograničavača struje kvara jako ovisi o vremenu trajanja prijelazne pojave i o izvedbi ograničavača, npr. premosnici. Općenito se može reći da supravodljivi ograničavač struje kvara neće reagirati na struje manje od 2 do 3· $I_n$ , ako prijelazno preopterećenje traje manje od sekunde. Da li će se uređaj odmah vratiti u normalni pogon ovisi o trajanju prijelazne pojave i o izvedbi premosnice. Ako je trajanje preko 100 ms, supravodljivi ograničavač struje kvara će se u osnovi ponašati kao u slučaju kvara kako je prethodno opisano. Kad se radi o izvedbi s "pogonskim oporavljanjem", uređaj će se vratiti u normalni pogon bez otvaranja kruga, sve dok trajanje prijelazne pojave ne prelazi nekoliko sekundi.

## 4. KONCEPCIJE RAZVOJA SUPRAVODLJIVIH OGRANIČAVAČA

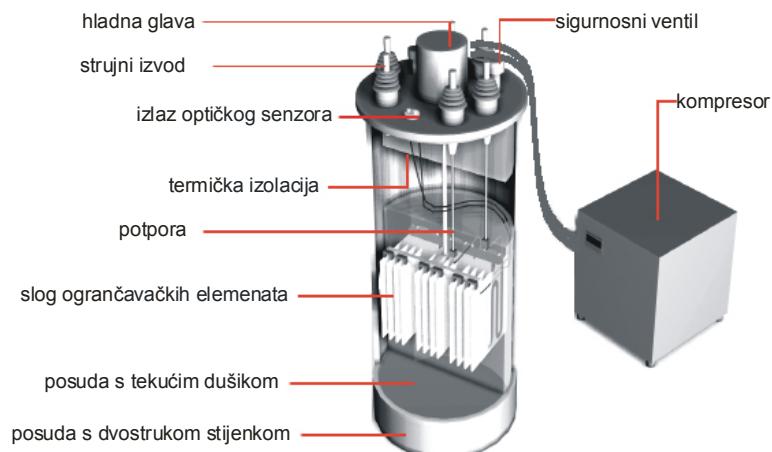
### 4.1. Otporni ograničavač struje kvara

U ovom konceptu, supravodič je spojen direktno na vod koji treba štititi (slika 3). Za vrijeme kvara, nadvišena je kritična struja supravodiča i njegov otpor naglo raste, što dovodi do aktivacije ograničavača struje kvara prije nego je dosegnuta prva vršna vrijednost struje kratkog spoja. Mogu se postići vremena kraća od 1 ms između pojave kvara i aktivacije ograničavača. Uređaj ima najmanji volumen i masu u usporedbi s drugim supravodljivim ograničavačima struje kvara, ali zahtijeva strujne izvode koji spajaju supravodič na vod što uzrokuje dodatne termičke gubitke. Izvedba strujnih izvoda treba osigurati što je manji mogući prijenos topline iz okoline u unutrašnji, tekućim dušikom ili helijem ispunjeni, dio uređaja. Slično kao i kod većine drugih izvedbi supravodljivih ograničavača struje kvara uređaj se mora isključiti nakon nepovratne aktivacije konvencionalnom mehaničkom sklopkom, budući da se materijal zagrijava za vrijeme faze ograničavanja struje. Nakon nekog vremena oporavka (obično u rasponu od nekoliko sekundi), u kojem medij za hlađenje hlađi materijal do radne temperature, ograničavač struje kvara

spreman je za ponovno djelovanje. Moguće su također posebne izvedbe kod kojih se supravodič može oporaviti do svoje radne temperature dok vodi nominalnu struju odmah nakon kvara. Međutim, takve izvedbe zahtijevaju velike količine vodiča te su zbog toga vrlo skupe.

#### Karakteristike:

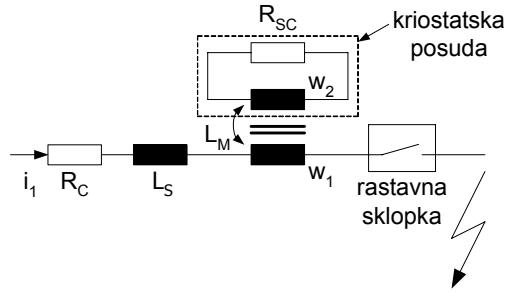
- samookidajući
- bez prekidanja struje
- ne može voditi struju kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja (moguće su izvedbe koje mogu voditi struju kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja)
- moguća ponovna upotreba nakon aktivacije bez zamjene dijelova ograničavača struje kvara



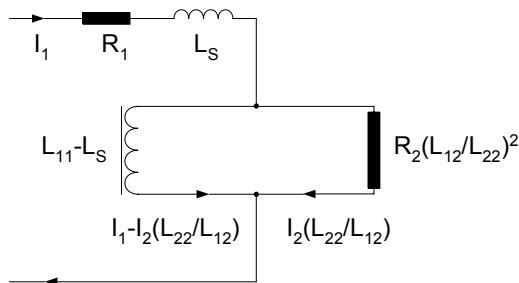
Slika 3. Otporni supravodljivi ograničavač struje kvara

#### 4.2. Ograničavač struje kvara sa zakriljenom željeznom jezgrom

Uređaj se sastoji od željezne jezgre, primarnog (vodljivog) namota, supravodljivog namota (supravodljive cijevi) i kriostatske posude. Uređaj se može promatrati kao transformator s kratkospojenim (supravodljivim) sekundarnim namotom (slika 4). Primarni namot spojen je u seriju s vodom koji se štiti. Hladi se samo supravodljiva cijev. Slika 5. prikazuje nadomjesnu shemu uređaja.  $R_1$  i  $R_2$  su otpori namota i supravodljive cijevi (tj. jednog zavoja),  $L_S$  je rasipni induktivitet,  $L_{11}$  i  $L_{22}$  su induktiviteti primarne i sekundarne strane, a  $L_{12}$  međuinduktivitet primarne i sekundarne strane.  $I_1$  i  $I_2$  su struje na primarnoj i sekundarnoj strani. Za vrijeme normalnog rada ukupna impedancija uređaja sastoji se od otpora i rasipne reaktancije oba namota, primarnog namota i sekundarnog supravodljivog namota. Može se reći da supravodljivi namot zakriljuje željeznu jezgru i u nju ne prodire magnetsko polje bakrenog namota, budući da je aksialno magnetsko polje u takvom "dugačkom" supravodljivom namotu jednak nuli zbog toga što zakrilne struje teku po vanjskoj površini supravodljivog namota. U tom stanju impedancija uređaja je vrlo mala. U slučaju kvara supravodič izlazi iz supravodljivog stanja, njegov otpor ( $R_{SC}$ ) naglo raste te se pomnožen s kvadratom prijenosnog omjera  $w^2 = (w_1/w_2)^2$  prenosi na primarnu stranu (drugim riječima: supravodič ne može više zakriljivati željeznu jezgru, magnetski tok ulazi u željeznu jezgru i velika impedancija se unosi u vod koji se štiti). Tako je ograničavač struje kvara sa zakriljenom željeznom jezgrom zapravo otporni ograničavač, ali se zbog induktivne veze između voda i supravodiča uređaj također često naziva "induktivni" ograničavač struje kvara.



Slika 4. Pojednostavljena shema supravodljivog ograničivača struje kvara sa zakriljenom željeznom jezgrom



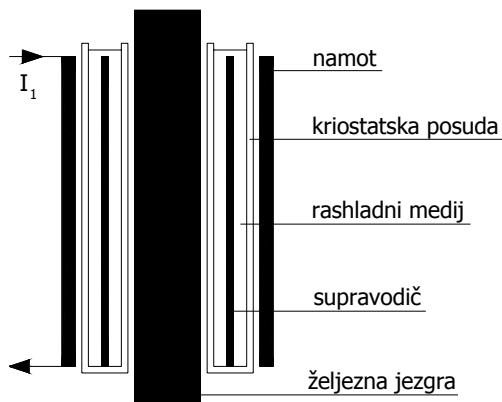
Slika 5. Nadomjesna shema supravodljivog ograničivača struje kvara sa zakriljenom željeznom jezgrom

Prednosti ove konцепције су:

- Nisu potrebni strujni izvodi za spajanje supravodiča te su na taj način izbjegnuti dodatni termički gubici i smanjen prijenos topline u dio uređaja ispunjen tekućim dušikom.
- Putem prijenosnog omjera  $w$  moguće je udešavanje potrebne impedancije koju u slučaju kvara treba ubaciti u mrežu.
- Budući da broj zavoja sekundarnog namota može biti mnogo manji (obično jedan zavoj) nego broj zavoja primarnog namota, potrebni su samo kratki supravodiči koje je lakše izraditi i kod kojih je lakše riješiti problem najtoplijih točaka. Na taj način je i pad napona na niskotemperaturnom dijelu uređaja vrlo mali (niski napon u kriostatskoj posudi).

Nedostatci ove konцепције су:

- Ne može se koristiti za istosmjerne primjene.
- Relativno veliki volumen i masa, otpriklike kao transformator jednake nazivne snage.
- Primarni namot dovodi do neželjene disipacije snage u normalnom pogonu.
- Za vrijeme ograničivačkog djelovanja supravodič se brzo zagrijava (Jouleova disipacija) zbog čega se (ograničena) struja mora prekinuti, konvencionalnom sklopkom, što je prije moguće kako bi se izbjeglo uništenje supravodiča. Supravodiču hlađenom tekućim dušikom potrebno je vrijeme oporavka od nekoliko desetaka sekundi. Nakon vremena oporavljanja sklopka se ponovno može zatvoriti za nastavak normalnog pogona (kad je kvar uklonjen) ili slijedeći ciklus ograničavanja (kad je kvar i dalje prisutan).



Slika 6. Presjek supravodljivog ograničavača struje kvara sa zakriljenom jezgrom

*Karakteristike:*

- samookidajući
- bez prekidanja struje
- ne može voditi struju kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja (moguće su izvedbe koje mogu voditi struju kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja)
- moguća ponovna upotreba nakon aktivacije bez zamjene dijelova ograničavača struje kvara

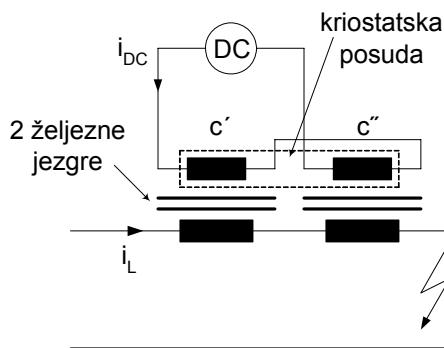
#### 4.3. Ograničavač struje kvara sa zasićenom željeznom jezgrom

Načelo predmagnetiziranih željeznih jezgri može se primijeniti kod izrade uređaja za ograničavanje struje. Načelo je staro, ali se korištenjem supravodiča drastično mogu smanjiti gubici u namotima za predmagnetiziranje zbog čega još uvijek postoje projekti koji ga koriste.

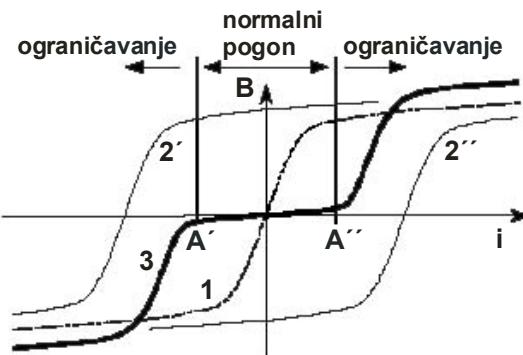
Na slici 7. prikazana je shema ograničavača struje kvara sa zasićenom željeznom jezgrom. Postoje dvije željezne jezgre s namotima, po jedna za svaki smjer izmjenične struje opterećenja  $i_L$ . Istosmjerni supravodljivi namoti c' i c" drže željezne jezgre u određenoj točki zasićenja te na taj način minimiziraju ukupni induktivitet uređaja. Slika 8. to pojašnjava prikazujući magnetske karakteristike primarnih namota bez (1) i s istosmjernim predmagnetiziranjem (2',2'') kao i rezultantnu krivulju (3). Ako  $i_L$  dosegne vrijednosti koje odgovaraju točkama A' ili A'' induktivitet naglo raste, a struja je ograničena induktivnim padom napona.

Prednost ove koncepcije je korištenje istosmjerne umjesto izmjenične struje u supravodiču. Na taj način izbjegnuti su izmjenični gubici, a to su uglavnom gubici zbog vrtložnih struja u supravodljivom materijalu. Uz to supravodič ostaje cijelo vrijeme u supravodljivom stanju što znači da nema problema s "najtoplijim točkama" uzrokovanim nejednolikom disipacijom snage za vrijeme prijelaza iz supravodljivog u vodljivo stanje, a uređaj ne treba vrijeme za oporavljanje nakon kvara.

Glavni nedostatak ovog uređaja je njegova velika masa i veliki volumen koji su otprilike dvostruko veći od mase i volumena transformatora iste nazivne snage. Do sada nije bilo intenzivnijeg razvoja visokotemperaturnog supravodljivog ograničavača struje kvara po ovom konceptu, uglavnom zbog dva razloga: a) veliki volumen i masa, b) relativno jaka magnetska polja oko supravodiča. Kod današnjih visokotemperaturnih supravodiča to zahtijeva radnu temperaturu u rasponu od 20 do 30 K s odgovarajuće povećanim troškovima hlađenja.



Slika 7. Pojednostavljena shema supravodljivog ograničavača struje kvara sa zasićenom željeznom jezgrom



Slika 8. Magnetska karakteristika istosmjerno predmagnetiziranog uređaja za ograničavanje struje

#### Karakteristike:

- samookidajući
- bez prekidanja struje
- može voditi struju kratkog spoja za vrijeme trajanja kratkog spoja
- moguća ponovna upotreba nakon aktivacije bez zamjene dijelova ograničavača struje kvara

## 5. ZAKLJUČAK

Korištenje supravodljivih ograničavača struje kvara u elektroenergetskim sustavima dovodi do, na prvi pogled, kontradiktorne mogućnosti rada sustava s velikim snagama kratkog spoja i malim strujama kvara. Kako bi mogao udovoljiti zahtjevima primjene u elektroenergetskom sustavu supravodljivi ograničavač struje kvara mora imati slijedeće karakteristike:

- kada nastane kratki spoj, supravodljivi ograničavač mora prijeći iz supravodljivog stanja u stanje normalne vodljivosti (mora proraditi) prije pojave prve vršne vrijednosti i ograničiti struju kvara
- prijelazne pojave koje nastaju kad se stavljaju pod napon kondenzatorske baterije i transformatori ili kad se pokreću motori ne smiju uzrokovati proradu supravodljivog ograničavača
- prenapon koji nastaje prilikom prorade mora biti u granicama koje su ispod dopuštene dielektrične čvrstoće opreme naponskog nivoa koji je u pitanju
- supravodljivi ograničavač ne smije utjecati na selektivnost zaštitne opreme
- vrijeme oporavka treba biti što je kraće moguće
- supravodljivi ograničavač se mora moći integrirati u postojeće postrojenje
- supravodljivi ograničavač mora biti pouzdan
- životni vijek supravodljivog ograničavača mora biti usporediv s onim konvencionalne opreme

Premda su u svijetu provedena, a i danas se provode, brojna istraživanja na polju razvoja aktivnih ograničavača struje kvara zasnovanih na konceptu supravodljivosti, za sada ona nisu dovela do ekonomski prihvatljivih rješenja za srednjenačke mreže.

## 6. LITERATURA

- [1] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, W. Lanz, M. Kleimaier: Superconducting Fault Current Limiter Applications, Technical and Economical Benefits, Simulations and Test Results; CIGRE Session 2000, Report 13-201, Paris 2000.
- [2] S. Fischer, H. Schmitt, R. R. Volkmar, Y. Brissette: System requirements and test of superconducting fault current limiters; CIGRE Session 2000, Report 13-207, Paris 2000.
- [3] M. P. Saravolac, P. Vertigen: Development and testing of a novel design concept for high temperature superconducting fault current limiter; CIGRE Session 2000, Report 13-204, Paris 2000.
- [4] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito, K. Tasaki, K. Tsurunaga: Development of a New 6.6 kV/1500 A Class SCFCL for Electric Power Systems; IEEE Transactions on Power Delivery, 8(1993)1, pp. 182-192.
- [5] W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, P. Unternährer, T. Baumann, M. Chen, L. Widenhorn, A. Guerig: Test of a 1.2 MVA High- $T_c$  Superconducting Fault Current Limiter; Supercond. Sci. Technol., 10(1997), pp. 914-918.
- [6] H. Schmitt, R. Krebs, K. Kunde, R. Witzmann, M. Kleimaier: New Switching and Current Limiting Technologies Application and System Requirements; CIGRE Session 2002, Report 13-108, Paris 2002.
- [7] CIGRE Working Group A3.10: Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems; lipanj 2003.
- [8] CIGRE Working Group A3.10: Fault Current Limiters – Application, principles and testing; Electra No. 211, 2003, pp. 47-57.
- [9] Michael Steurer, Klaus Fröhlich: Current Limiters – State of the Art; Fourth Workshop & Conference on EHV Technology, Bangalore India, srpanj 1998.