

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

OGRANIČAVAČI STRUJE KVARA U DISTRIBUTIJSKIM MREŽAMA

SAŽETAK

U distribucijskim mrežama Hrvatske trenutno ne postoji potreba ugradnje ograničavača struje kvara budući da struje kratkog spoja ne prelaze prekidnu moć ugrađenih sklopnih aparata. Međutim porast potrošnje, odnosno proizvodnje električne energije u budućnosti sigurno će dovesti do porasta struje kratkog spoja iznad dopuštenih vrijednosti za ugrađenu opremu. Upravo zbog toga u ovom referatu razmatra se ugradnja ograničavača struje kvara kao jedno od mogućih rješenja takvih problema.

Ključne riječi: ograničavač struje kvara, struja kratkog spoja, spojno polje, trafostanica

FAULT CURRENT LIMITERS IN DISTRIBUTION NETWORKS

SUMMARY

For the time being, there is no need for installation of fault current limiters in croatian distribution networks, since the short circuit currents do not exceed a short circuit capacity of installed switchgear devices. However, a growth in the generation of electrical energy, in the future, will for sure result with increase of a short circuit current over permissive values of installed equipment. Therefore, in this paper the installation of fault current limiters, as one of possible solutions for such problems, is discussed.

Key words: fault current limiter, short circuit current, bus tie, substation

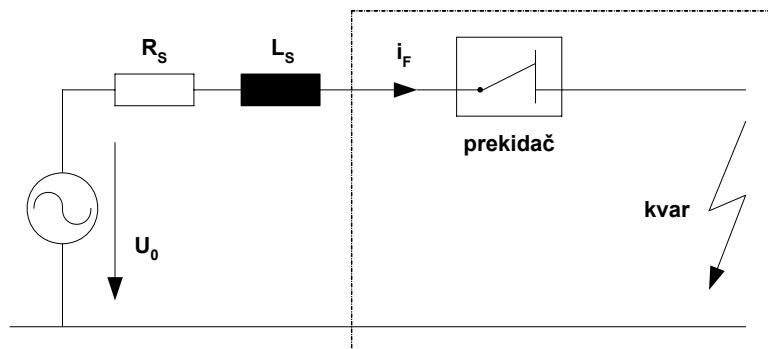
1. UVOD

Kvarovi u elektroenergetskim sustavima ne mogu se izbjegći. Osim šteta koje nastanu u blizini kvara – npr. zbog učinaka električnog luka – struje kvara koje teku od izvora do mjesta kvara dovode do velikih dinamičkih i termičkih opterećenja opreme kao što su nadzemni vodovi, kablovi, transformatori i sklopni aparati. Prekidači stoga moraju imati mogućnost da (selektivno) prekidaju struje koje nastaju pri takvim kvarovima.

Povećana proizvodnja električne energije i povezivanje mreža dovodi do većih struja kvara. Posebno, stalni porast proizvodnje električne energije ima za posljedicu da mreže dosežu ili čak

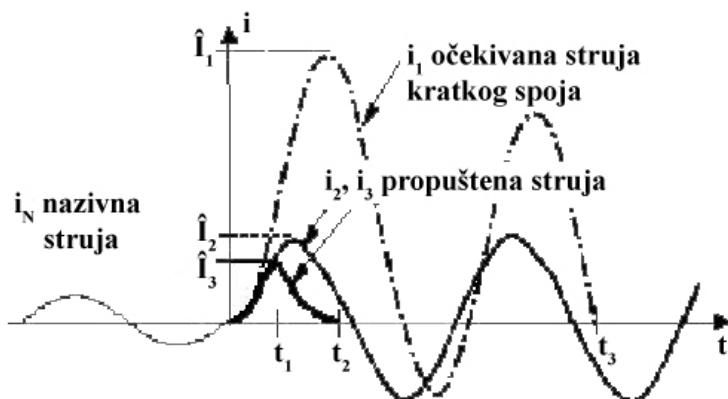
nadilaze svoje granice s obzirom na moguću opteretivost strujom kratkog spoja. Korištenje ograničavača struje kvara (FCL – fault current limiter) omogućuje da oprema ostane funkcionalna čak i kada očekivana struja kvara prijeđe njezinu nazivnu vršnu i kratkotrajno podnosivu struju, a u slučaju prekidača također njihovu nazivnu uklopnu i prekidnu struju kratkog spoja. Zamjena opreme može se izbjegći ili u krajnjem slučaju odgoditi za kasnije. U slučaju novoplaniranih mreža ograničavači struje kvara dopuštaju korištenje opreme s nižim nazivnim vrijednostima, što omogućuje značajne finansijske uštede.

Slika 1. prikazuje jednostavni ekvivalentni strujni krug za razmatranje problema vezanih uz ograničavanje struje kvara u elektroenergetskim sustavima [3]. Neovisno od struje opterećenja koja teče prije kvara, struja kratkog spoja počinje rasti određenom brzinom ovisno o parametrima strujnog kruga (napon izvora U_0 i impedancija izvora $Z_S = R_S + jX_S$) i o faznom kutu pri nastanku kvara. Bez ograničenja, poteći će struja kvara i_1 sa slike 2. (očekivana struja kratkog spoja). Tu struju prekinut će konvencionalni prekidač u trenutku t_3 .



Slika 1. Ekvivalentni strujni krug koji prikazuje stanje kvara

Najjednostavniji način za ograničenje struje kratkog spoja upotreba je impedancije izvora prikladno velike vrijednosti. Neka rješenja upotrijebljena u srednjenačkim i visokonačnim mrežama temelje se na ovoj metodi. Nedostatak te metode je u tome što utječe na sustav i za vrijeme normalnog pogona.



Slika 2. Tipični valni oblici struje kvara

Da bi se ograničila prva vršna vrijednost \hat{I}_1 struje kratkog spoja i_1 nužno je da uređaj za ograničavanje djeluje u vremenskom intervalu t_1 te da ograniči brzinu porasta struje na vrijednost $di/dt \leq 0$. To se može postići jedino tako da pad napona na induktivitetu strujnog kruga L_S postane jednak nuli $u_L = L_S \frac{di}{dt} = 0$, što podrazumijeva ubacivanje prikladno visokog pada napona u strujni krug. Takvo rješenje (mijenjanje parametara strujnog kruga) zahtijeva upotrebu nelinearnih elemenata i dovodi do struja oblika i_2 odnosno i_3 , ovisno o tome da li je struja samo ograničena (i_2) ili ograničena i prekinuta (i_3). Kako bi se postigla učinkovitost, treba naglasiti, da vrijeme djelovanja uređaja za ograničavanje struje (CLD – current limiting device) mora biti u rasponu $t_1 < 1...1.5$ ms za industrijsku frekvenciju $f_N = 50$ Hz.

2. PREGLED KONVENCIONALNIH I NEKONVENCIONALNIH RJEŠENJA OGRANIČAVAČA STRUJE KVARA

Mjere za ograničavanje struje kvara mogu se podijeliti na pasivne i aktivne [3]. Razlike između pasivnih i aktivnih mjera navedene su u tablici I. Pasivne mjere povećavaju impedanciju izvora i u nominalnom stanju i u stanju kvara, dok aktivne mjere dovode do brzog povećanja impedancije izvora samo u stanju kvara.

Aktivni ograničavači struje kvara mogu biti okarakterizirani na slijedeći način:

- sa samostalnim ili vanjskim okidanjem
- s prekidanjem ili bez prekidanja struje
- može ili ne može voditi struju kratkog spoja za trajanja kratkog spoja (tj. 1 s ili 2 s, primjenjivo za uređaje bez prekidanja struje)
- s mogućom ili nemogućom ponovnom upotrebotom nakon aktivacije bez zamjene dijelova ograničavača struje kvara

Tablica I. Pregled mjera za ograničavanje struje kvara

PASIVNE MJERE povećanje impedancije u nominalnim uvjetima i u stanju kvara	<ul style="list-style-type: none"> • razdvajanje mreža • razdvajanje sabirnica • uvođenje viših naponskih nivoa 	Topološke mjere
	<ul style="list-style-type: none"> • transformatori s povećanom impedancijom kratkog spoja • prigušnice za ograničavanje struje kvara 	
AKTIVNE MJERE mala impedancija kod nazivnog opterećenja, a brzo povećanje impedancije u stanju kvara	<ul style="list-style-type: none"> • visokonaponski osigurači • I_S-ograničavači <p>Novi pristupi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • supravodljivi ograničavači • PTC-otpornici • ograničavači s tekućim metalom • poluvodički ograničavači • ograničavači koji koriste EM sile • hibridni ograničavači 	Mjere pomoću aparata

Umjesto korištenja ograničavača struje kvara problemi povezani s povećanim strujama kvara mogu se riješiti mjerama kao što su:

- promjene u topologiji mreže, npr. razdvajanje mreža ili razdvajanje sabirnica
- uvođenje viših naponskih nivoa
- izbor transformatora s većom impedancijom kratkog spoja
- povećanje nazivnih vrijednosti sklopnih aparata i druge opreme
- upotreba sinhronih prekidača
- upotreba složenih upravljanja kao što je sekvencialno okidanje

2.1. Postojeća rješenja

U tablici II. dan je pregled uređaja za ograničavanje struje kvara koji su komercijalno dostupni.

Tablica II. Pregled postojećih rješenja

Tip	Karakteristike		
	Pasivni/ Aktivni	Način okidanja	Prekidanje struje
Prigušnica za ograničavanje struje kvara	pasivni	-	-
Transformator s povećanom impedancijom kratkog spoja	pasivni	-	-
Visokonaponski osigurač	aktivni	samookidajući	da
Protehnički ograničavač struje kvara (Is-ograničavač)	aktivni	vanjsko okidanje	da

2.2. Novi pristupi

U tablici III. dan je pregled uređaja za ograničavanje struje kvara koji su još u fazi istraživanja i razvoja. Prototipovi nekih od tih uređaja već su probno ugrađeni u elektroenergetske sisteme.

Iako su u prošlosti provedena, a i danas se provode brojna istraživanja, trenutno stanje stvari na polju uređaja za ograničavanje struje kvara svodi se na konvencionalna rješenja koja su navedena u prethodnom poglavljiju. Za sada niti jedan od novih pristupa nije doveo do ekonomski prihvatljivog rješenja ograničavača struje kvara za srednjenačiske mreže.

Tablica III. Novi pristupi

Tip	Karakteristike		
	Pasivni/ Aktivni	Način okidanja	Prekidanje struje
Supravodljivi otporni ograničavač struje kvara	aktivni	samookidajući	ne
Supravodljivi ograničavač struje kvara sa zakriljenom željeznom jezgrom	aktivni	samookidajući	ne
Supravodljivi ograničavač struje kvara sa zasićenom željeznom jezgrom	aktivni	samookidajući	ne
Supravodljivi ograničavač struje kvara – strujni kontroler	aktivni	vanjsko okidanje	(1)
Ograničavač struje kvara zasnovan na PTC-otpornicima (2)	aktivni	samookidajući	da (3)
Ograničavač struje kvara s tekućim metalom	aktivni	samookidajući	ne
Poluvodička sklopka za ograničavanje struje kvara	aktivni	vanjsko okidanje	da
Poluvodički ograničavač struje kvara s impedancijom za ograničavanje struje	aktivni	vanjsko okidanje	da
Poluvodički ograničavač struje kvara zasnovan na hibridnom načelu	aktivni	vanjsko okidanje	da
Ograničavač struje kvara s pomakom luka	aktivni	vanjsko okidanje	da

Napomene: 1) ovisi o izvedbi uređaja; 2) PTC – positive temperature coefficient; 3) s integriranim serijskom sklopkom

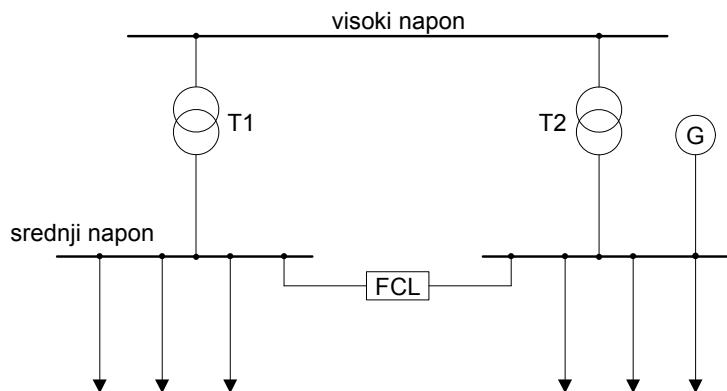
3. MJESTA UGRADNJE OGRANIČAVAČA STRUJE KVARA

Ograničavači struje kvara ugrađuju se u spojna polja, dovodna polja ili odvodna polja trafostanica. Prema istraživanjima radne grupe CIGRE A3.10, vezanim za najpogodnija mjesta za

ugradnju ograničavača struje kvara, 52% ograničavača bit će ugrađeno u spojna polja, 33% u dovodna polja, a 15% u odvodna polja.

3.1. Ograničavači struje kvara u spojnim poljima

Umjesto projektiranja dva sustava za ukupnu struju kratkog spoja ograničavač struje kvara postavljen je u spojno polje (slika 3). U slučaju kvara on smanjuje vršnu struju kratkog spoja kod početnog porasta struje.



Slika 3. Ograničavač struje kvara u spojnom polju trafostanice

Prednosti ovakve primjene:

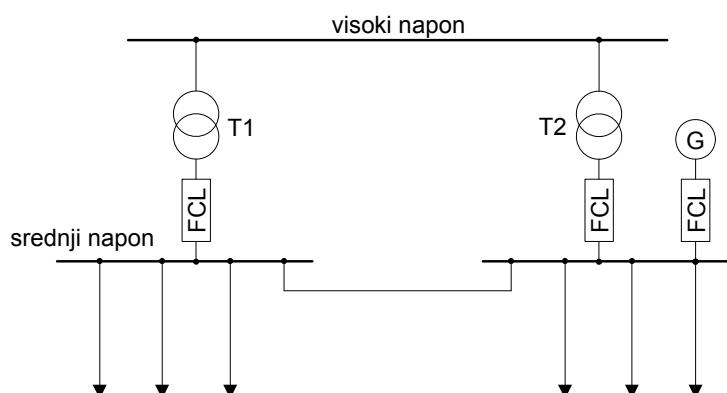
- paralelnim spajanjem transformatora (dva sustava), transformatori će biti ravnomjerno opterećeni
- smanjenje tražene kratkospojne opteretivosti elemenata sustava
- smanjenje impedancije mreže
- nema odspajanja pojnih transformatora nakon okidanja ograničavača struje kvara

Nedostatak ovakve primjene:

- ukoliko nastane kratki spoj na jednoj sekciji (slika 3) sprječen je samo doprinos porastu struje kratkog spoja iz druge sekcije

3.2. Ograničavači struje kvara u dovodnim (trafo, generatorskim) poljima

Umjesto projektiranja sustava za ukupnu struju kratkog spoja ograničavači struje kvara postavljeni su u dovodna polja. Kod ovog spoja, ako nastane kvar, svaki ograničavač struje kvara smanjiće vršnu struju kratkog spoja kod početnog porasta struje.



Slika 4. Ograničavači struje kvara u dovodnim poljima trafostanice

Prednosti ovakve primjene:

- paralelnim spajanjem transformatora (dva sustava), transformatori će biti ravnomjerno opterećeni

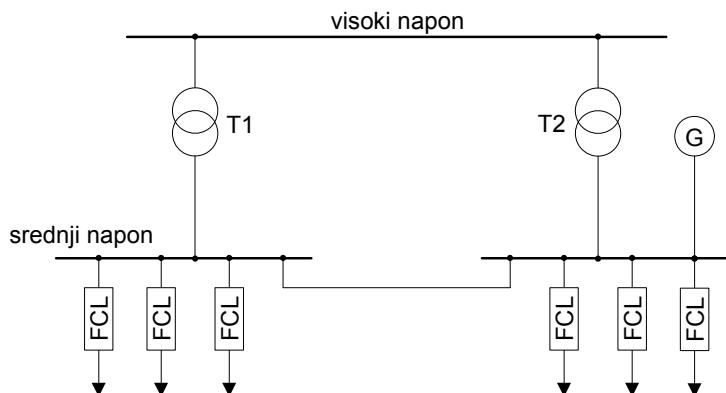
- smanjenje tražene kratkospojne opteretivosti elemenata sustava
- smanjenje impedancije mreže
- struja kratkog spoja izvora napajanja (transformatora i generatora) bit će smanjena

Nedostatak ovakve primjene:

- ukupni gubici mogu biti veliki budući da doprinos pojedinog polja može biti velik

3.3. Ograničavači struje kvara u odvodnim poljima

Umjesto projektiranja podsustava za ukupnu struju kratkog spoja, ograničavač struje kvara postavljen je u svako odvodno polje (slika 5). Također kod ovog spoja u slučaju kvara svaki ograničavač struje kvara smanjuje vršnu struju kratkog spoja kod početnog porasta struje.



Slika 5. Ograničavači struje kvara u odvodnim poljima trafostanice

Prednosti ovakve primjene:

- paralelnim spajanjem transformatora (dva sustava), transformatori će biti ravnomjerno opterećeni
- smanjenje tražene kratkospojne opteretivosti elemenata podsustava
- smanjenje impedancije mreže
- manji gubici i bolja mogućnost regulacije nego u prethodnom slučaju budući da je doprinos pojedinog polja manji
- prisutnost ograničavača u odvodnom polju smanjuje pad napona na sabirnici za vrijeme kratkog spoja što povećava stabilnost strojeva napajanih preko drugih odvodnih polja

Nedostatak ovakve primjene:

- U svako odvodno polje postavljen je ograničavač struje kvara. Time će biti smanjena samo struja koja teče prema odvodnom polju u kvaru. Glavna sabirnica mora biti projektirana za ukupnu struju kratkog spoja.
- visoka cijena

4. OGRANIČAVAČI STRUJE KVARA U DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA HRVATSKE

Jedna od mogućih primjena ograničavača struje kvara bila bi njihova ugradnja u trafo polja trafostanica 110/x kV kako bi se, u slučaju porasta struja kratkog spoja, izbjegla potreba ugradnje sklopnih blokova dimenzioniranih za veće struje kratkog spoja.

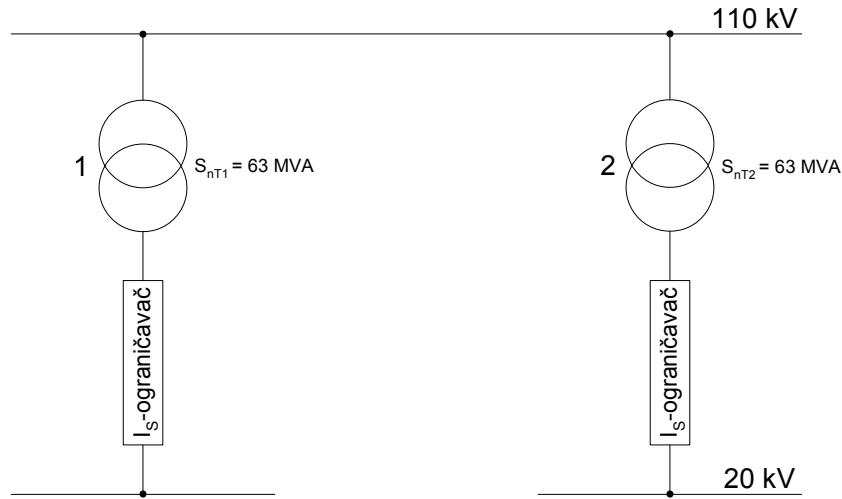
Budući da su svi uređaji za ograničavanje struje kvara koji su zasnovani na novim principima (npr. supravodljivi ograničavači, ograničavači zasnovani na PTC otpornicima) još uvijek u fazi razvoja i istraživanja te kao takvi nisu dostupni na tržištu, za sada se za ograničavanje struje kvara u elektroenergetskim mrežama koriste konvencionalni uređaji. Jedan od takvih uređaja, koji bi se mogao koristiti u distribucijskim mrežama Hrvatske, je pirotehnički ograničavač struje kvara odnosno I_s -ograničavač tvrtke ABB.

Sadašnje stanje u distribucijskim mrežama Hrvatske je takvo da struje kratkog spoja na naponskim nivoima 10 i 20 kV ne prelaze 16 kA. Ukoliko bi porast potrošnje električne energije tj. povećana proizvodnja u budućnosti uzrokovala porast struja kratkog spoja na tim naponskim nivoima

na vrijednosti veće od 16 kA, umjesto sklopne aparature dimenzionirane za struju kratkog spoja od 16 kA, kakva se sada ugrađuje, trebalo bi ugraditi sklopnu aparaturu dimenzioniranu za struju kratkog spoja od 25 kA.

Ovdje su opisana dva različita slučaja, do kojih dovodi porast struja kratkog spoja, kroz koje su sagledani gospodarski učinci ugradnje pirotehničkih ograničavača u postrojenja.

Prvi slučaj je izgradnja nove TS 110/20 kV (2 x 63 MVA) s 35 vodnih polja u koju će umjesto sklopnih blokova prekidne moći 16 kA biti ugrađeni sklopni blokovi prekidne moći 25 kA. Takav postupak, prema današnjim cijenama sklopnih blokova nazivnog napona 24 kV, doveo bi do povećanja investicijskih troškova od otprilike 2.000,00 € po sklopnom bloku, odnosno 70.000,00 € za cijelu TS. Ugradnjom pirotehničkih ograničavača u trafo polja takve TS, kao što je prikazano na slici 6, može se izbjegići ugradnja sklopnih blokova veće prekidne moći, ali bi povećanje troškova u tom slučaju bilo 230.000,00 €, budući da je današnja cijena pirotehničkog ograničavača nazivnog napona 24 kV, tvrtke ABB, 115.000,00 €. Iz svega navedenog može se zaključiti da bi ugradnja pirotehničkih ograničavača u ovom slučaju bila ekonomski opravdana samo ako bi cijena jednog bila ispod 35.000,00 €, što se može očekivati u budućnosti.

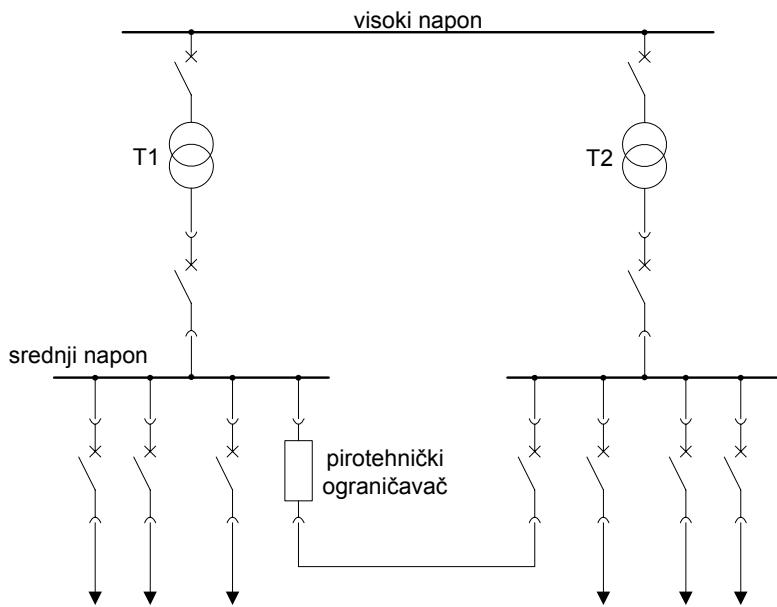


Slika 6. Primjer ugradnje pirotehničkih ograničavača u trafo polja trafostanice 110/20 kV (2 x 63 MVA)

Drugi slučaj je rekonstrukcija postojeće TS 110/20 kV s 35 vodnih polja u kojoj je, zbog porasta struja kratkog spoja, stare sklopne blokove prekidne moći 16 kA potrebno zamijeniti novima prekidne moći 25 kA. Današnja cijena sklopног bloka nazivnog napona 24 kV i prekidne moći 25 kA iznosi 23.500,00 € što znači da bi troškovi takve zamjene iznosili 822.500,00 € (bez troškova montažnih radova i iskorištenja postojeće opreme). Ugradnjom ograničavača u trafo polja takve TS može se izbjegići zamjena starih sklopnih blokova te oni mogu ostati funkcionalni. Takav postupak u ovom slučaju ima ekonomsko opravdanje budući da je cijena dva ograničavača 230.000,00 €, čime se ostvaruje ušteda od 592.500,00 €.

Druga moguća primjena ograničavača struje kvara u distribucijskim mrežama Hrvatske bila bi njihova ugradnja u spojna polja trafostanica kao što je prikazano na slici 7. Ovakvom ugradnjom ograničavača mogu se iskoristiti sve prednosti paralelnog rada transformatora i izbjegći nedostatak zbog kojeg je sadašnja praksa da transformatori rade u odvojenom pogonu. Naime, nedostatak paralelnog rada transformatora, bez ugrađenog ograničavača u spojno polje, je velika struja kratkog spoja do koje dolazi zbog smanjenja impedancije kratkog spoja. Zbog toga srednjenaopske sabirnice i vodna polja moraju biti dimenzionirane upravo za tu ukupnu struju kvara. Ugradnjom ograničavača u spojno polje taj nedostatak je izbjegnut budući da ograničavač u slučaju kvara smanjuje vršnu struju kratkog spoja kod početnog porasta struje te se na taj način srednjenaopske sabirnice i vodna polja mogu dimenzionirati za puno manju struju kratkog spoja odnosno za onu struju koja bi tekla kad bi transformatori radili odvojeno. Neke od prednosti paralelnog rada transformatora su: smanjena impedancija mreže u normalnom pogonu, veća pouzdanost opskrbe električnom energijom i ravnomjerno opterećenje transformatora.

Prilikom ugradnje ograničavača struje kvara u spojno polje trafostanice potrebno je razmotriti uzemljenje trafostanice i po potrebi ga rekonstruirati. Također je potrebno izraditi upute za siguran rad nove i postojeće (rastavljač u neutralnoj točki) opreme.



Slika 7. Ograničavač struje kvara u spojnom polju trafostanice

5. ZAKLJUČAK

Glavni razlog zbog kojeg je ugradnja ograničavača u nova postrojenja distribucijskih mreža Hrvatske, za sada, ekonomski neopravdvana njihova je današnja cijena, koja je izuzetno visoka (više od 100.000,00 € za pirotehnički ograničavač). Međutim, za očekivati je da će u budućnosti razvoj ograničavača zasnovanih na novim konceptima dovesti do rješenja koja će izazvati znatno sniženje cijena. U slučajevim potrebe rekonstrukcije postojećih postrojenja, zbog porasta struja kratkog spoja, ugradnja ograničavača kao alternativa zamjeni stare opreme dovodi do finansijskih ušteda te je na taj način ekonomski opravdana.

6. LITERATURA

- [1] CIGRE Working Group A3.10: Fault Current Limiters in Electrical Medium and High Voltage Systems; lipanj 2003.
- [2] CIGRE Working Group A3.10: Fault Current Limiters – Application, principles and testing; Electra No. 211, 2003, pp. 47-57.
- [3] Michael Steurer, Klaus Fröhlich: Current Limiters – State of the Art; Fourth Workshop & Conference on EHV Technology, Bangalore India, srpanj 1998.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H. Fukagawa, T. Matsumura, T. Ohkuma, S. Sugimoto, T. Genji, H. Uezono: Current state and future plans of fault current limiting technology in Japan; CIGRE Session 2000, Report 13-208, Paris 2000.