

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
velimir.ravlic@ravel.hr
Ravel d.o.o.

dr. sc. Sonja Ravlić Begić, mag. ing. el.
sonja.ravlic@ravel.hr

UTJECAJ PORASTA NAZIVNIH STRUJA I STRUJA KRATKOG SPOJA NA IZVEDBU 420 kV POSTROJENJA VANJSKE IZVEDBE U NJEMAČKOJ

SAŽETAK

Sve do 1995. godine u Njemačkoj se nije očekivala viša naponska razina od 420 kV. Međutim, pogonske (i nazivne) struje polja u visokonaponskim postrojenjima su porasle na 3150 A i 4000 A, a nazivne struje sabirnica i do 8000 A. U oko 40 % postrojenja maksimalne struje kratkog spoja su bile 50 kA. Zbog svega navedenog oprema treba biti adekvatno dimenzionirana kako bi zadovoljila zahtjeve u svezi termičkih i mehaničkih opterećenja, kao i zahtjeve u svezi jakosti magnetskog i električnog polja, korone i radio smetnji. Pri tome treba maksimalno voditi računa da su oprema i tehnička rješenja maksimalno standardizirana. Termički utjecaji struja kratkih spojeva imaju direktan utjecaj na izvedbu opreme za uzemljenje, a posebno zemljospojnika. Zbog kompleksnosti mehaničkih utjecaja prilikom protjecanja struja kratkih spojeva bilo je potrebno izvršiti vrlo detaljne analize i brojna ispitivanja. U ovom radu se razmatra utjecaj početka i trajanja kratkih spojeva kao i brzog automatskog ponovnog uklopa. Dodatno su opisana osnovna tehnička rješenja karakterističnih 420 kV postrojenja u Njemačkoj, pri čemu su posebno opisana rješenja sa užetima i cijevnim vodičima te smjernice u svezi utjecaja struja kratkog spoja kao i neke mogućnosti smanjenja potrebnog prostora za izgradnju 420 kV postrojenje.

Ključne riječi: snop, užetni vodiči, cijev, struja opterećenja, 420 kV postrojenje vanjske izvedbe, struja kratkog spoja, analiza konstrukcije, dispozicija transformatorske stanice

THE INFLUENCE OF THE INCREASE OF RATED CURRENTS AND SHORT CIRCUIT CURRENTS IN 420 kV SWITCHGEAR IN GERMANY

SUMMARY

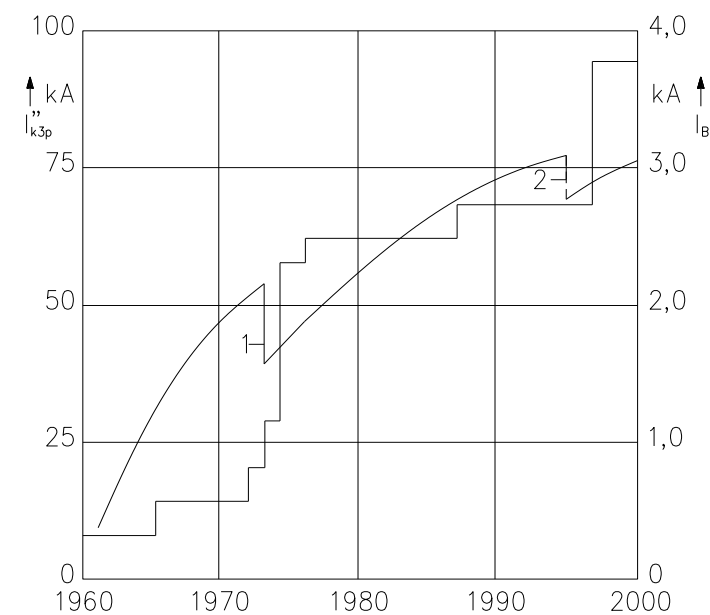
Until 1995. in Germany the voltage level was not expected to exceed 420 kV. However, operational and rated feeder currents in high voltage substations have increased to 3150 A and 4000 A, and rated busbar currents up to 8000 A. In about 40 percent of substations the short circuit currents were 50 kA. High voltage equipment dimension needs to take into consideration thermal and mechanical requirements as well as the strength of electric and magnetic field, corona and radio interferences. Equipment and technical solutions should be maximum standardized. The thermal effects of short circuit currents have a direct influence on the earthing devices. Due to the complexity of mechanical influences during short circuit currents, it was necessary to carry out analyses and extensive experiments. This paper deals with the influence of the initiation and duration of short circuit as well as rapid auto reclosure. In addition, common characteristics of German 420 kV outdoor substations are described, with special regard to bundle conductors and tubular conductors, guidelines for decrease of short circuit currents as well as possibilities of reducing the site area requirements.

Key words: bundle, stranded conductor, tube, load current, outdoor 420 kV switchgear, short-circuit current, structural analysis, substation layout

1. UVOD

U Njemačkoj je već 1995. godine oko 60 % proizvodnje električne energije bilo spojeno na 420 kV mrežu. U odnosu na 1975. godinu broj 420 kV postrojenja se povećao za 10 puta, tj. bilo ih je preko 140, ali su se smanjile srednje udaljenosti između postrojenja na oko 50 km. Zbog povećanja stupnja povezivanja 420 kV postrojenja došlo je do značajnog porasta vrijednosti nazivnih struja i struja kratkih spojeva. Treba naglasiti da je u međuvremenu došlo i do povezivanja elektroenergetskih sustava pojedinih država u Europi na naponskim razinama iznad 420 kV.

Slika 1 prikazuje porast maksimalnih početnih simetričnih struja kratkih spojeva I''_{k3} u 420 kV mreži Njemačke kao i maksimalnih nazivnih struja 420 kV polja I_B . Prikazane vrijednosti struja kratkih spojeva (maksimalne) se odnose na oko 5 % postrojenja. Za 35 % postrojenja struje kratkih spojeva su između 50 kA i vrijednosti sa slike 1, a za ostala postrojenja su između 20 kA i 50 kA. Vrijednosti nazivnih struja polja su prvenstveno određene nazivnim snagama proizvodnih jedinica u elektranama i u znatno manjoj mjeri nazivnim snagama transformatora i vodova. Pri tome se pretpostavilo da su nazivne snage budućih proizvodnih jedinica (maksimalne) između 1300 MW i 1400 MW. Zbog toga su maksimalne nazivne struje polja između 3000 A i 4000 A, a maksimalne nazivne struje sabirnica do 8000 A.

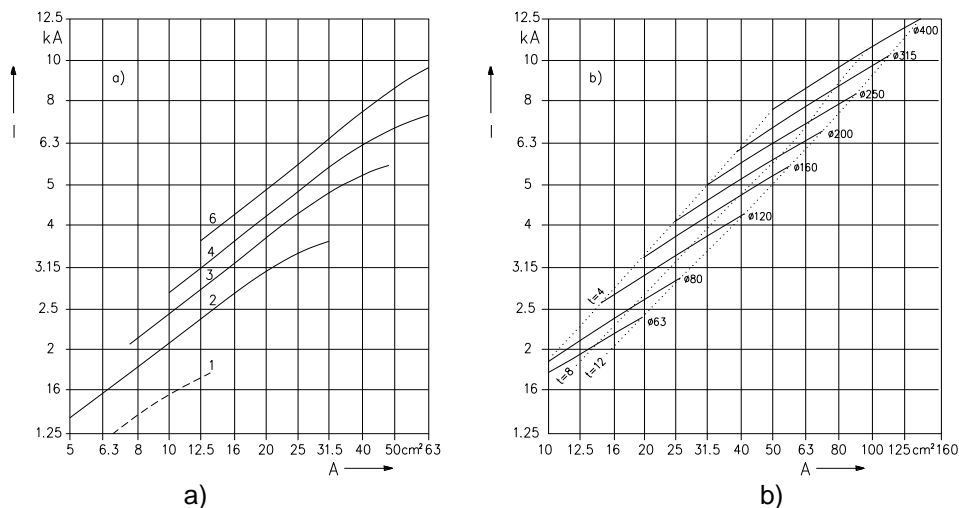


Slika 1. Maksimalne nazivne struje u 420 kV mreži Njemačke

Oznake na slici 1 su sljedeće: I_B je nazivna struja polja, I''_{k3} početna simetrična struja trolnog kratkog spoja, brojem 1 označen je rad dva sustava glavnih sabirnica, a brojem 2 predviđeni rad tri sustava glavnih sabirnica. Sa slike 1 očita je važnost razmatranja dopuštene kratkospojne čvrstoće u slučaju dogradnje mreže kod postojećih postrojenja.

2. NAZIVNA STRUJNA OPTEREĆENJA

Minimalna vrijednost nazivne struje vodiča u postrojenjima 420 kV je oko 1250 A. Budući da se vodiči dimenzioniraju prvenstveno u svezi zadovoljenja zahtjeva mehaničke čvrstoće kao i utjecaja radio smetnji i korone (slika 2), stvarne su vrijednosti nazivne struje vodiča najčešće dva ili tri puta veće od minimalnih vrijednosti u realnim situacijama. Na slici 2 prikazane su nazivne struje vodiča uz porast temperature vodiča za 50 °C, kako za užetne vodiče tako i za cijevne vodiče, i to na osnovi analize konstrukcije kako bi se dobilo optimalno rješenje. Ekonomski čimbenici značajno utječu na izbor vodiča. Aluminijski vodiči odnosno legure aluminija su potpuno zamijenile bakar i iz tehničkih i iz ekonomskih razloga. Sada se koriste uglavnom veličine od oko 5 i 10 cm² za presjeke užeta za aluminij i od 0,5 cm² za čeličnu jezgru zbog sila zatezanja užetnih vodiča sabirnica. Također, u određenim slučajevima koriste se i veći presjeci (i do 20 cm²) aluminija. U slučaju cijevnih sabirnica koristi se, kao optimalno rješenje primjena legure E-AlMgSi0,5F2 vlačne čvrstoće 220 N/mm² i vodljivosti 30·m/Ωmm² pri čemu se koriste obično dva vanjska promjera cijevi. Na taj se način maksimalno standardiziralo broj tipova stezaljki. Nazivno strujno opterećenje se podešava koristeći različite debljine stjenke cijevnih vodiča.

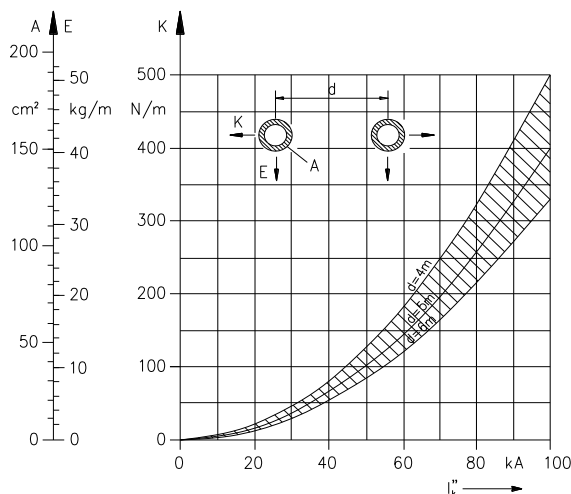


Slika 2. Nazivna struja/aluminijskih vodiča kod porasta temperature za 50 °C
a) Al ili AlČ vodiči (čelična jezgra presjeka oko 0,5 cm²)
A – presjek Al vodiča (krivulja 1) i ukupni presjeci snopa Al vodiča (2,3,4 i 6 vodiča – krivulje 2,3,4 i 6)
b) Cijevni vodiči iz legure E-AlMgSi0,5F2:
A – presjek vodiča u cm²
φ - vanjski promjer u mm
t – debljina stijenke u mm

3. KRATKOSPOJNA ČVRSTOĆA

Unatoč činjenici da se prilikom planiranja, održavanja i redovnog pogona elektroenergetskog sustava uzimaju u obzir, povremeni kratki spojevi (najčešće uzrokovani atmosferskim uvjetima) ne mogu se izbjeći. Pri tome treba razlikovati utjecaj kratkog spoja na samom mjestu kvara što je općenito opisano pojavom luka i utjecaja djelovanja kratkog spoja koje ima posljedice na kompletno postrojenje, točnije duž čitave petlje kratkog spoja pri čemu dijelovi postrojenja moraju izdržati djelovanje kratkog spoja bez oštećenja.

Termički utjecaj često kod velikih struja kratkih spojeva zahtijevaju velike presjeke vodiča, pri čemu je posebna poteškoća s dimenzioniranjem uređaja za uzemljenje.



Slika 3. Težina vodiča i sile kratkog spoja u 420 kV postrojenjima

Oznake na slici 3 su sljedeće: A označava presjek vodiča u cm², E težinu aluminijskih vodiča, K srednju vrijednost sile kratkog spoja, I''_{k3} početnu simetrični struji dvopolnog kratkog spoja, a d razmak između simetrala faza.

Međutim, mehanički utjecaj kratkog spoja su mnogo složeniji. Efektivne vrijednosti struja kratkog spoja za sada se mogu pretpostaviti ugrubo u razmjernom odnosu s težinom vodiča, ali se pretpostavlja da će njihov iznos biti znatno veći u budućnosti (slika 3). Osim toga, velike struje kratkog spoja uzrokuju opterećenja potpornih izolatora koja uzrokuju naprezanja na savijanje, koja su znatno opasnija od uzdužnih (longitudinalnih) naprezanja čiji su uzrok težina vodiča. Mehanički odziv opreme na promjene sila uslijed djelovanja struja najviše zavisi o vibracijskim karakteristikama elemenata postrojenja.

U slučaju dispozicijskih rješenja sa cijevnim sabirnicama, a na osnovi rezultata mjerenja, zaključena je primjena jako pojednostavljenih fizikalnih modela koji su se prije koristili, kao što su greda koja vibrira u jednom rasponu, vibrator s dvije mase, općenito sposobna reproducirati samo aproksimativno dinamičke utjecaje u 420 kV postrojenjima. Točniji proračuni se vrše uz primjenu računala i uzimaju u obzir kompletan sustav koji vibrira što uključuje vodiče, izolatore, aparate, nosive konstrukcije, temelje [3].

Zbog velikog broja slobodnih parametara, mogućih utjecaja nelinearnosti i rubnih uvjeta kao i međudjelovanja različitih materijala, bilo je potrebno izvršiti više kratkospojnih ispitivanja kako bi se računalni programi mogli usavršiti. Ispitivanja provedena osamdesetih godina dvadesetog stoljeća pokazala su vrlo dobro slaganje između rezultata mjerenja i proračuna.

Prethodna saznanja o odnosima između karakterističnih parametara užetnih vodiča u slučaju kratkih spojeva i ponašanja vodiča u snopu u slučaju kratkih spojeva, kao što su razmaci između vodiča u snopu i broj odstoynika u rasponu, su znatno revidirana na osnovu rezultata brojnih ispitivanja. Rezultati provedenih istraživanja doveli su do novih norma [5] koje daju upute za proračune kratkospojnih naprezanja pri čemu je od primarne važnosti podatak da su sile u slučaju primjene vodiča u snopu 110 % u odnosu na sile kada je primijenjen jedan vodič istog presjeka i ukoliko se proračuni vrše prema istoj metodologiji.

Slična istraživanja su izvršena i u drugim državama kao i u sklopu WG 02 Studijskog komiteta SC23 CIGRE [6]. U idućim odjeljcima razmatrati će se neka specifična pitanja kao što su utjecaj dispozicijskih rješenja na vjerojatnost nastanka kvarova ili zadovoljenje određenih projektnih mjera. Pri tome su se prvenstveno razmatrala postrojenja sa cijevnim sabirnicama, ali se razmatranja mogu proširiti i na užetne sabirnice.

3.1. Maksimalne sile kratkog spoja

Prilikom proračuna iznosa sila kratkog spoja uobičajena je pretpostavka da se trolpolni kratki spoj događa istovremeno u sve tri faze i u najnepovoljnijem trenutku. Amplitude sila kratkog spoja su tada približno šest puta veće od srednjih vrijednosti kratkospojnih sila prikazanih na slici 3. Pri tome je značajna razlika između sila koje se javljaju prilikom dvopolnih kratkih spojeva i sila koje djeluju na središnji vodič te sila koje djeluju na vodiče vanjskih faza u slučaju trolpolnih kratkih spojeva. Suprotno široko rasprostranjenom mišljenju, magnitude sila uslijed djelovanja struja nisu dovoljan podatak za određivanje javljaju li se maksimalna naprezanja na vodiče i potporne izolatore u srednjoj fazi ili su maksimalna naprezanja na vodiče u vanjskim fazama i pripadajućim potpornim izolatorima, već se treba uzeti u obzir utjecaj vlastite frekvencije vodiča i potpornih izolatora.

Maksimalna naprezanja u vanjskim fazama kod trolpolnih kratkih spojeva su dominantna zbog relativno malih vrijednosti vlastitih frekvencija u visokonaponskim postrojenjima u odnosu s pogonskom frekvencijom 50 Hz. Kratkospojna ispitivanja izvedena na užetnim sabirnicama su pokazala da se rezultati tih ispitivanja mogu primijeniti i na cijevne vodiče jer u slučaju trolpolnog kratkog spoja središnji vodič u slučaju dispozicije vodiča u jednoj ravnini ima vrlo malo gibanje te u slučaju primjene jednog vodiča po fazi nema nikakvog mehaničkog utjecaja. U slučaju sila kratkog spoja koje djeluju na vanjske vodiče kod rasporeda vodiča u jednoj ravnini, sile su u funkciji trenutka isklapanja i uvijek su veće od 75 % od maksimalno moguće vrijednosti. Promjene vrijednosti oko maksimuma su unutar 95 % te vrijednosti uz vjerojatnost 0,4 [7].

Međutim, pretpostavka da su višepolni kratki spoj događa istovremeno je nerealna, najčešće u slučaju netočno uklapanja na kratkospojeni i uzemljeni dio postrojenja zbog uobičajenog rasipanja vlastitih vremena prekidača u sklopu slijeda pogonskih sklopnih operacija [8]. Krive pogonske operacije najčešće slijede sljedeću sekvencu događaja: spoj sa zemljom jedne faze, dvopolni kratki spoj su zemljom, trolpolni kratki spoj.

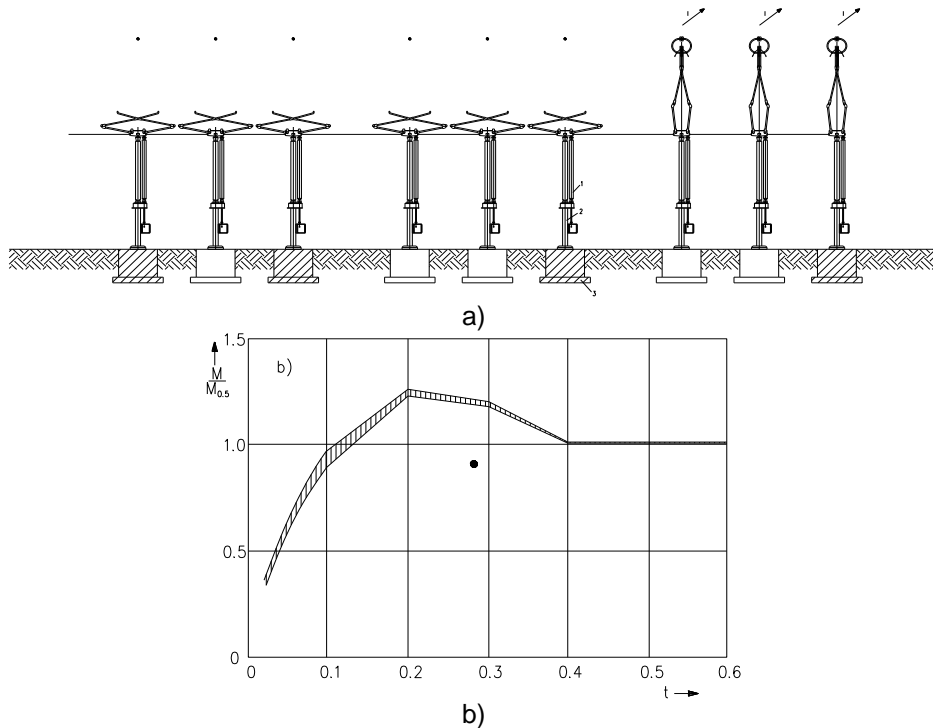
Usporedbom sa istovremenim (simultanim) trolpolnim kratkim spojem, imamo sljedeća maksimalna povećanja:

- a) povišenje vršne asimetrične struje kratkog spoja za 17 % i
- b) povišenje maksimalne sile kratkog spoja za 40 %.

Mehanička reakcija opreme je gotovo u pola manja. Ukoliko se maksimum događa u uvjetima nesimultanog početka kratkog spoja, može se pretpostaviti da taj utjecaj iznosi 1,3 puta iznosa kratkospojnog opterećenja koje se javlja kod simultanih početnih uvjeta [9].

3.2. Trajanje kratkog spoja

Kinetička energija koja se apsorbira za vrijeme vrlo kratkog trajanja protjecanja struje kratkog spoja je mala. U slučaju postrojenja sa cijevnim sabirnicama vidljivo je da smanjenje trajanja kratkog spoja ima za posljedicu smanjenje naprezanja. Slika 4a) prikazuje dio presjeka kroz postrojenje sa slike 9. Prema slici 4b) znatnije smanjenje naprezanja se događa samo u slučaju ekstremnog skraćenja protjecanja struje, tako da je npr. 50 % smanjeno naprezanje kod trajanja kvara 0,03 s. Ukoliko kvar traje između 0,1 s i 0,4 s javlja se povećanje naprezanja, koje je funkcija trenutnog stanja vibracija u trenutku isklopa.

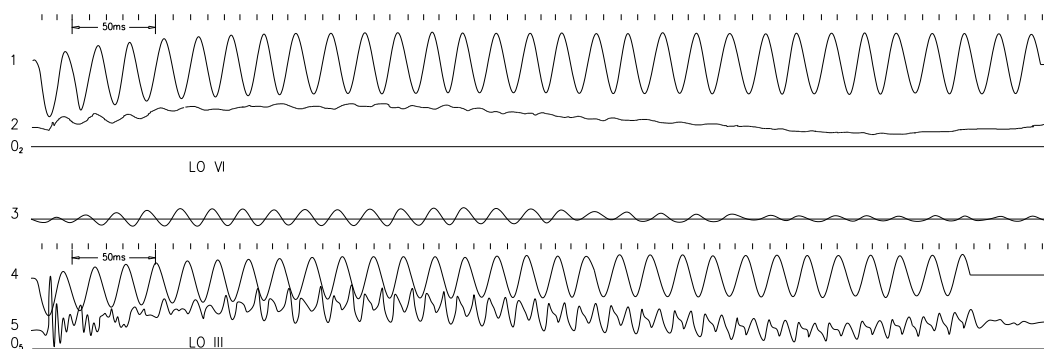


Slika 4. Utjecaj trajanja kratkog spoja na mehanička naprezanja

- a) Razmatrano vodno polje, osnovne vanjske dimenzije prikazane su na slici 9
- b) Rezultati mjerenja za točke 1, 2 i 3 pri čemu je prikazan omjer momenta savijanja M za vrijeme protjecanja struje t i momenta savijanja $M_{0,5}$ za 0,5 s
- 1 – Izolator pantografskog rastavljača
- 2 – Postolja
- 3 – Temelj

U slučaju harmoničkih rezonantnih vibracija konstrukcije uslijed sila kod djelovanja struja kvara, ukupno vrijeme prekidanja zbog djelovanja relejne zaštite i prekidača koji se danas najčešće primjenjuju ne omogućuje značajno smanjenje mehaničkih naprezanja. U skladu s izvedbom postrojenja, vidljivo je sa slike 4b) da zaštitni releji i prekidači s kraćim vremenima djelovanja imaju prednost samo u slučaju kada su vremena trajanja kvara smanjena značajno ispod 100 ms.

Slični zaključci vrijede i u slučaju postrojenja s užetnim sabirnicama. Slika 5 prikazuje karakteristični oscilogram snimljen tijekom ispitivanja sabirnica s vodičima u snopu, pri čemu dijagram 2, 3 i 5 prikazuje tipične promjene naprezanja potpornih izolatora i vlačnih sila vodiča. Vidljivo je da čak i maksimalno moguće smanjenje trajanja protjecanja struje kvara ima vrlo mali utjecaj na početni maksimum zbog vrlo brze kontrakcije (stezanje) vodiča. Navedeno znači da tijekom naprezanja vodiča i spojeva vršnim vrijednostima sila daje gotovo jednake vrijednosti kao i u postrojenjima sa cijevnim sabirnicama.



Slika 5. Oscilogram ispitivanja snopa dva vodiča za raspon dužine 15 m i razmak između simetrala faza 4 m; vodiči su 537/53 mm² AlČ, razmak između simetrala vodiča u snopu je 60 mm, ukupno su 3 odstojnika u rasponu 1 i 4 – krivulje struje:

$$I_k = 30 \text{ kA};$$

$$I_s = 78,3 \text{ kA}$$

$$t = 0,6 \text{ s}$$

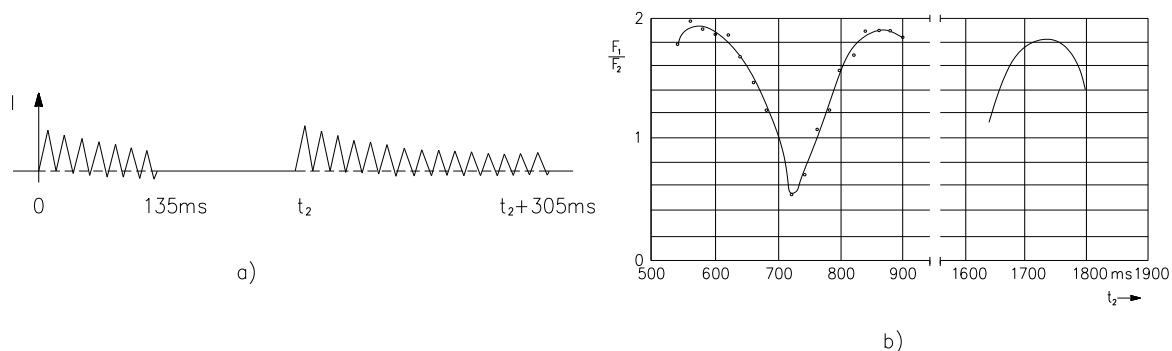
2 i 3 – Naprezanja izolatora: 2 – uzdužno: 6,45 kN;

3 – poprečno: 1,45 kN; statička vlačna sila vodiča prije početka kratkog spoja: 2,65 kN

5 – Vlačna sila vodiča: maksimalna vrijednost 9,5 kN nakon 0,01s

3.3. Brzi automatski ponovni uklop

U slučaju neuspješnog automatskog ponovnog uklopa, maksimalne struje kratkog spoja će vjerojatno protjecati, nakon ponovnog uklopa. Dodatno treba naglasiti da je utjecaj brzog automatskog ponovnog uklopa funkcija prirodne vlastite frekvencije i trenutnog stanja vibracija u točkama zavješanja i novog početka protjecanja struje. U najnepovoljnijim trenucima sklapanja, mehanička naprezanja mogu se povećati i do 100 %. Slika 6 prikazuje rezultate ispitivanja za izvedbe postrojenja sa cijevnim sabirnicama kada je izmjereno povećanje bilo 95 %. Tako visoke vrijednosti naprezanja mogu se izbjeći ako se primjenjuje samo jednopolno automatsko ponovno uklapanje.



Slika 6. Naprezanje izolatora F_2 kod automatskog ponovnog uklopa u slučaju kratkog spoja u odnosu na F_1 kada nema brzog automatskog ponovnog uklopa

a) ciklus sklapanja

b) prikaz rezultata u odnosu na vrijeme t_2

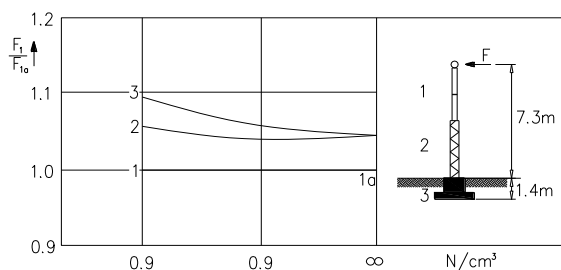
3.4. Nosive konstrukcije

Krutost nosivih izolatora, kao i njihove karakteristike, mogu se mijenjati izborom odgovarajućeg materijala i/ili presjeka. Međutim, to može uzrokovati samo male promjene naprezanja jer su prirodne vlastite frekvencije nosivih konstrukcija u visokonaponskim postrojenjima, uz sve te promjene, samo nekoliko Hz. S druge strane otkloni moraju biti ograničeni na određenu vrijednost (npr. zbog ispravnog rada pantografskih rastavljača) tako da se u postrojenjima visokog i vrlo visokog napona naprezanje može smanjiti samo neznatno uz primjenu navedenih mjera.

3.5. Temelji

Uzimajući u obzir visinu opreme koja se montira, temelji se uglavnom projektiraju prvenstveno na taj način da izdrže horizontalna opterećenja, tj. opterećenja uslijed vjetrova i kratkog spoja. Sada su opterećenja uslijed struja kratkog spoja znatno veća nego u prošlosti zbog porasta struja kratkog spoja. S druge strane i efektivna trajanja sila uslijed kratkog spoja ne prelaze 0,5 s tako da se može pretpostaviti da se maksimalni moment javlja u donjem dijelu temelja što znači da se može značajno smanjiti u slučaju izvedbe velikih temelja. Međutim, konkretni proračuni mehaničkih naprezanja uslijed kratkog spoja ne potvrđuju navedenu pretpostavku, a što je vidljivo sa slike 7 pri čemu je F virtualna sila (stacionarna vrijednost) koja djeluje na savijanje i prevrtanje te je jednakog utjecaja kao pripadajući maksimalni dinamički moment savijanja i moment prevrtanja. Ukoliko je tijekom ispitivanja dobivena vrijednost ekvivalentne sile vrlo blizu pretpostavljene vrijednosti, zavisno o elastičnosti tla, naprezanja kojima su podvrgnuti temelji su do 5 % veća od naprezanja u nosivoj konstrukciji, a naprezanja nosive konstrukcije su veća za 5 % do 10 % od naprezanja izolatora. To pokazuje da masivni temelji u kombinaciji s tlom s uobičajenim karakteristikama neće imati veliki utjecaj na smanjenje naprezanja.

Prilikom dimenzioniranja temelja ne smije se zaboraviti da je vjerojatnost nastanka kratkih spojeva mala. Zbog toga su dopušteni znatno veći momenti za kratkospojna opterećenja nego za opterećenja uslijed vjetrova (vidi Tablice 1 i 2).



Slika 7. Utjecaj karakteristike tla (elastičnosti S) na kratkospojno naprezanje

- 1 - Izolator
- 1a - Referentna vrijednost
- 2 - Nosiva konstrukcija (postolje)
- 3 - Temelji

Karakteristike tla imaju neznatan utjecaj na sva naprezanja kojima su podvrgnuti izolatori i nosive konstrukcije.

Osnovne karakteristike tla su:

- γ - težina jedinice volumena suhog tla;
- γ' - težina jedinice volumena uronjenog tla;
- φ - kut otpornosti na smicanje (kut unutarnjeg trenja tla);
- τ_{dop} - specifično dopušteno opterećenje tla;
- c - kohezija;
- τ_{op} - dopušteni prosječni napon na odrez.

Parametri γ , γ' , φ , τ_{op} , c i σ_{dop} odnose se na tlo iznad stope temelja, a σ_{dop} na tlo ispod stope temelja.

4. PROJEKTIRANJE OPREME U SVEZI MEHANIČKE ČVRSTOĆE

Prikazani podaci pokazuju da za ispravno projektiranje postrojenja u svezi mehaničke čvrstoće s ciljem optimalnog tehničkog i ekonomskog rješenja zahtijeva poznavanje što točnijih vrijednosti sila i njihovih utjecaja, ali također zahtijeva analizu statističke vjerojatnosti nastanka istovremene pojave više događaja, uzimajući u obzir krutost i duktilnost karakteristika pojedinih elemenata komponenata postrojenja. Uz primjenu raznih normi važno je koristiti i rezultate brojnih ispitivanja kako bi se mogli što točnije procijeniti različiti utjecaji i primijeniti saznanja iz različitih znanstvenih disciplina budući da su tehnički rješenja i dijelovi postolja kao i mikrolokacije postrojenja vrlo različite.

5. NEKI TIPOVI DISPOZICIJA POSTROJENJA VISOKOG NAPONA

5.1. Općenito

U Njemačkoj 420 kV postrojenja imaju sljedeće zajedničke karakteristike:

Ograničenje jednog iznosa za sabirničke vodiče, a drugog za spojne vodiče, korištenje pantografskih rastavljača za spojeve sa sabirnicama te smještaj prekidača i mjernih transformatora izvan zone sabirnica. To rezultira jednostavnim dispozicijskim rješenjem, kompaktnom izvedbom i olakšanim pristupom prilikom montaže i održavanja. Bez obzira na način izvedbe vodiča sabirnica i spojnih vodova (donja ili gornja razina), što prvenstveno zavisi o zahtjevima pogona, način izvedbe ne zavisi o tipu vodiča (uže ili cijevni vodič). Zahtjev u svezi broja glavnih sabirnica i primjeni pomoćnih sabirnica zavisi o zahtjevima elektroenergetskog sustava (okolne mreže). Pomoćne sabirnice se mogu izbjeći u slučaju da je mreža dovoljno izgrađena tako da prijenosna moć vodova omogućava da se pojedina polja u postrojenjima mogu isključiti određeno vrijeme kako bi se omogućio remont, revizija ili zamjena opreme.

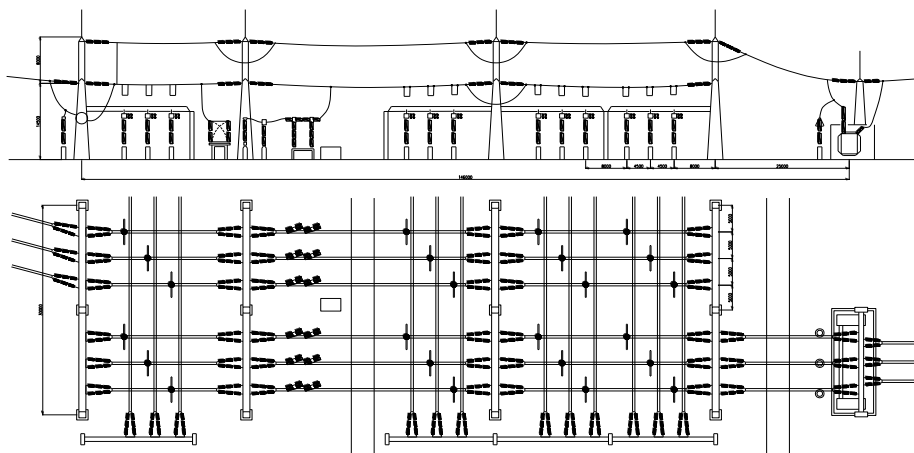
Razmaci između simetrala faza iznosa od 4 do 6 m rezultiraju zahtjevnim minimalnim razmacima od 2,9 m [10] i omogućuju takve dimenzije postrojenja koje zadovoljavaju i zahtjeve u svezi otklona vodiča zbog djelovanja vjetrova i kratkog spoja. Zbog želje za ostvarenjem kompaktne izvedbe postrojenja, ali i želje za ostvarenjem što povoljnijih transportnih staza za potrebe održavanja i remonta, širine polja iznose između 18 m i 22 m. Prednost kod primjene užetnih sabirnica je mogućnost da više polja može biti unutar istog raspona, tj. bez primjene potpornih izolatora u pojedinim poljima. U slučaju cijevnih sabirnica ne treba koristiti dodatne potporne izolatore unutar širine polja, već samo na granicama pojedinog polja. Smanjenje ukupnog broja potpornih izolatora i izolatorskih lanaca pozitivno djeluje na povećanje dielektrične čvrstoće postrojenja.

Ovakva dispozicijska rješenja mogu se koristiti i za najviše razine kvara pri čemu će veći razmaci između potpornih izolatora unutar 420 kV postrojenja lošije podnositi veće iznose struja kratkih spojeva i pripadajuće sile kratkog spoja (za standardne vrijednosti dopuštenih prijelomnih sila potpornih izolatora koji se danas proizvode).

U daljnjem detaljnijem opisu rješenja opisane su osnovne značajke rješenja i moguće modifikacije s ciljem podizanja kratkospojne čvrstoće.

5.2. Postrojenja sa užetnim sabirnicama

Prva 420 kV postrojenja u Njemačkoj bila su projektirana s vrlo visokim stupnjem sigurnosti i izgrađena su 1957. godine, i to s užetnim sabirnicama. Ubrzo su smanjene neke dimenzije i faktori sigurnosti bez smanjenja sigurnosti pogona [11, 12]. To je rezultiralo izvedbom postrojenja koja se i danas primjenjuju uvažavajući tehničko-tehnološka unapređenja u proizvodnji aparata i projektiranju postrojenja. Tako npr. dispozicija prikazana na slici 8 s tri sustava glavnih sabirnica i pomoćnim sabirnicama s jedne strane je prikladna za rad dva sustava glavnih sabirnica. Zbog činjenice da su prekidači smješteni s iste (jedne) strane, spojni vodovi do polovice polja moraju biti zavješeno na trećoj razini iznad prostora sabirnica. Međutim, ovakvo rješenje pruža značajnu prednost u svezi smanjenja potrebnog prostora i ukupne cijene projekta.



Slika 8. Dispozicija 420 kV postrojenja vanjske izvedbe s užetnim sabirnicama s tri sustava glavnih sabirnica i pomoćne sabirnice

Nazivna struja sabirničkog sustava postrojenja prikazanog na slici 8 je 6000 A, a nazivna struja vodnih polja 3000 A. Pri tome se koristi samo jedan tip užetnih vodiča AIČ 1045/45 mm² karakteristika prema DIN 48204. Za sabirnički sustav se koriste po četiri vodiča u snopu, a za vodna polja po dva takva vodiča u snopu. Vodiči su na bliskoj udaljenosti u snopu tako da se u slučaju kratkog spoja dodiruju te na taj način smanjuju udarne sile kratkog spoja koje zbog stezanja (engl. peak forces due to contraction) ostaju malene. Može se smatrati da je ovaj uvjet zadovoljen ako su središta vodiča jednako ili manje udaljena od dvostrukog promjera vodiča i ako je udaljenost između odstojnika iznosi najmanje 50 puta promjer vodiča [4, 5]. Ispitivanja starenja (engl. long term tests) su pokazala da se vodiči vjerojatno neće biti oštećeni čak i ako se međusobno dodiruju stalno ili slučajno zbog magnetskog djelovanja struje opterećenja.

Kako bi se izbjegle pretjerane kratkospojna naprezanja, vodiči spojnih vodova obje razine su ovješeni na čelične portalne konstrukcije, a ne na potporne izolatore ili aparate u postrojenju. Vodiči sabirnica su ovješeni na izolatore te takav način spajanja omogućuje klizno pomicanje ili savijanje. Neželjene točke strujnog pomaka i oštećenja uslijed uzdužnih (longitudinalnih) pomaka su na taj način izbjegnute. Spojni vodovi na aparate zahtijevaju nenapete (labave) spojeve. U normalnom pogonu potporni izolatori moraju primarno podnijeti vertikalna opterećenja, a u slučaju kratkih spojeva, oni su opterećeni horizontalnim opterećenjima vodiča koji nisu visokih vrijednosti. Potporni izolatori standardne izvedbe i dopuštene prijelomne sile 12,5 kN sposobni su izdržati utjecaje sila kratkog spoja do struja $I''_{k3} = 70$ kA. U nekoliko postrojenja su iznosi struja I''_{k3} bili i veći, pa su se u tim postrojenjima radije koristili potporni izolatori dopuštene prijelomne sile 16 kN umjesto promjene tipskih dispozicijskih rješenja u svezi povećanja razmaka simetrala faza i smanjenja razmaka između točaka učvršćenja.

U postrojenjima s vrlo visokim strujama kratkog spoja, priključnice pantografskih rastavljača su izvedene fleksibilno pomoću opruga ili petlji. To omogućava da se priključnice ne pomiču valovito uslijed sila kratkog spoja ili čak da iskrene kontakte pantografskih rastavljača.

Petlje vodiča ispod trebaju biti pojačane kako bi se smanjili vertikalni otkloni u slučaju kratkih spojeva. Pri tome treba naglasiti da petlje učvršćene izolatorima ili pojačane metalnim trakama imaju odlične karakteristike, što je dokazano ispitivanjima u ispitnim stanicama i u izgrađenim postrojenjima. U slučaju velikih presjeka vodiča, npr. kod primjene vodiča AIČ 1045/45 mm², zadovoljavajuća krutost najčešće se postiže izvedbom petlje sa snopom od četiri vodiča uske izvedbe [13].

Ispitivanja su pokazala da zatezni izolatori štapne izvedbe iz više dijelove ili izolatorski lanci (najčešće sastavlja iz staklenih članaka) znatno prigušuju otklone vodiča u snopu u slučaju kratkih spojeva kako za vrijeme protjecanja struje kratkog spoja tako i nakon završetka protjecanja struje kratkog spoja. Ograničenja u svezi dinamičkih opterećenja su u dijelovima ovjesne opreme, nosivoj konstrukciji ili u dopuštenim naprezanjima oprema koja se spaja.

Treba istaknuti da činjenicu da su već tijekom pedesetak godina iskustva sa užetnim sabirnicama izvršna određena poboljšanja u svezi izvedbe postrojenja, a posebno u svezi spojne i ovjesne opreme i kontaktnog sustava rastavljača. Pri tome se nije mijenjala osnovna koncepcija postrojenja već su se u pojedinim slučajevima vršila poboljšanja s ciljem racionalnijeg održavanja postrojenja i zbog različitog nepovoljnog utjecaja okoline. Rešetkasta konstrukcija trokutaste izvedbe omogućava sniženje cijene, olakšava montažu te omogućava montažu u kutu. Nosači (postolja) za konstrukcije u polju koji imaju samo vertikalna opterećenja mogu biti jeftinije izvedbe. Nosive konstrukcije sabirnica omogućuju lako proširenje i održavanje postrojenja, kao i zadovoljavajuću raspoloživost.

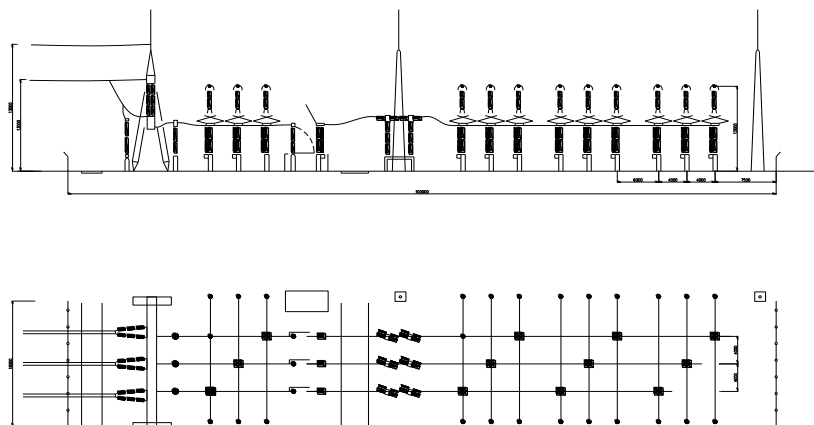
5.3. Postrojenja sa cijevnim sabirnicama

Krajem 1960. godina počinju se primjenjivati rješenja sa cijevnim sabirnicama. Osnovna prednost primjene cijevnih sabirnica kod izgradnje novih postrojenja je u znatnom smanjenju potrebnog prostora [13]. Sva dispozicijska rješenja postrojenja vanjske izvedbe mogu se izvesti i sa cijevnim sabirnicama, kao i s užetnim sabirnicama. To je vidljivo i sa slika 8 i 9 koje prikazuju dispozicije postrojenja s tri sustava glavnih sabirnica i pomoćnim sabirnicama. Činjenica da je sabirnički sustav, na slici 9 iznad spojnih vodova u polju ne mijenja navedeno načelo.

Cijevne sabirnice zahtijevaju znatno manje čelične konstrukcije i temelja u odnosu na užetne sabirnice. S druge strane, u slučaju cijevnih sabirnica potreban je veći broj potpornih izolatora i stezaljki.

Za dispoziciju postrojenja sa slike 9 koristi se standardno rješenje sa cijevnim vodičima iz E-AlMgSi0,5 legure vanjskog promjera 250 mm. Ovakva cijev zadovoljava sve električke i mehaničke zahtjeve. Prema slici 2, ovakva cijev ima nazivno strujno opterećenje 5 kA uz 4 mm debljinu stjenke i više od 8 kA uz 12 mm debljinu stjenke, što je zadovoljavajuće rješenje za dulji niz godina pri čemu neće biti ograničenja gornje granice biti zbog utjecaja skin efekta. Za raspone do 22 m dužine, debljine stjenke od 4 mm i 5 mm su donja granica zbog mehaničkih naprezanja i obično se uzimaju debljine stijeni preko 6 mm

bez obzira na način učvršćenja cijevnih vodiča (između dvije uporišne točke ili preko više polja, tj. uporišnih točaka).



Slika 9. Dispozicija 420 kV postrojenja vanjske izvedbe sa cijevnim sabirnicama: trostruki sustav glavnih sabirnica i pomoćne sabirnice

Danas se najčešće koriste rješenja s učvršćenjem cijevnih vodiča na dvije uporišne točke (jednostavna greda) i zatim fleksibilno povezuju cijevni vodiči s odvojim stezaljkama (vijčane stezaljke). Osnovna prednost ovog rješenja je u jednostavnijoj analizi svih opterećenja i mogućnosti laganog odvajanja u bilo kojoj uporišnoj točki, što omogućava praktično razdvajanje kod prekida i nastavka radova, itd. S druge strane ovakvo rješenje zahtijeva skuplje stezaljke nego u slučaju montaže cijevi preko više polja, jer su cijevi podvrgnute većim progibima i mehaničkim naprezanjima. U slučaju kratkih spojeva ovo rješenje s razdvajanjem krutih cijevnih vodiča je bolje kao i u slučaju vanjskih opterećenja uslijed vjetra kada su izolatori u slučaju cijevnih vodiča montiranih preko više polja više napregnuti.

Cijevni vodiči bez zglobnih spojeva, s dužinama i preko 100 m su često klizno učvršćene na potporne izolatore ili druge dijelove postrojenja (npr. rastavljače) na način da je isključen prijenos momenata na potporu točke (najčešće potporne izolatore). Pri tome se vrši spajanje zavarivanjem i vijčanim krutim stezaljkama na mjestima gdje momentna krivulja prolazi kroz malu, tj. na mjestima najmanjih naprezanja. Za dispozicijsko rješenje prema slici 4a, pozicije su takve da je opterećenje izolatora povećano za oko 20 %, a naprezanje cijevnih vodiča je smanjeno za 25 %. U slučaju aparata različitih karakteristika kao što su npr. prekidači, strujni transformatori, rastavljači, itd., naprezanje može biti značajno veće u zavisnosti o krutosti mehaničkog spoja različitih vibrirajućih elemenata postrojenja.

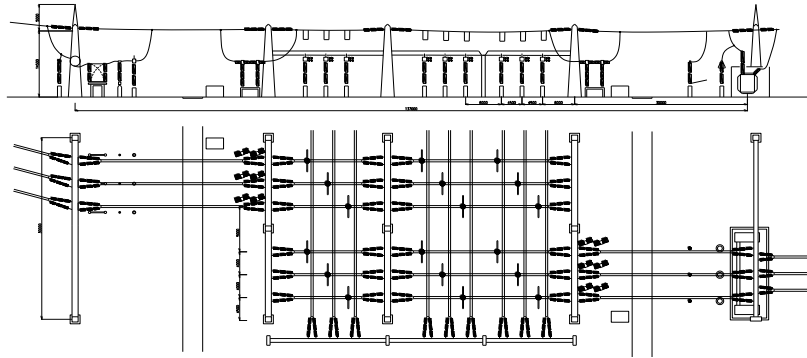
Pokazuje se da postoje odstupanja magnitude i potpuno suprotni zahtjevi na izvedbu stezaljki [13]. Izrada kontaktnog sustava je vrlo bitna i na taj se način postiže sigurni nadzor kod protjecanja velikih nazivnih i kratkospojnih struja, a što je potvrđeno brojnim ispitivanjima, zbog činjenice da se različiti elementi koriste za prijelaz struje i za mehaničko nošenje cijevnih vodiča.

5.4. Dispozicije s raspodijeljenim poljima

Kako je s vremenom trebalo sve više polja priključiti u 420 kV postrojenja, to je i problem raspoloživog prostora postajao sve veći. U slučaju postrojenja s trostrukim sustavom glavnih sabirnica te s pomoćnim sabirnicama, i s prekidačima s jedne strane (slika 8 i 9) postignuto je sačuvano je oko 35 % prostora u usporedbi s prvim dispozicijskim rješenjima 420 kV postrojenja u Njemačkoj. Prostor se može još više smanjiti ako se pomoćne sabirnice razdijele i kada se polja ugrubo raspodijele simetrično oko sabirničkih sustava. U 110 kV i 220 kV postrojenjima dobilo se na taj način dodatnih 15 % smanjenja potrebnog prostora.

Na slici 10 prikazan je prijedlog takve dispozicije za 420 kV postrojenje s užetnim sabirnicama. Uz korištenje širine polja od 30 m za dva polja smanjuje se ne samo potrebni prostor za oko 20 % već također i veličine čelične konstrukcije i temelja, što dodatno smanjuje ukupnu cijenu postrojenja.

Ovakva dispozicijska rješenja pokazala su se dovoljno pouzdana i sigurna uz zadovoljenje primjene svih normi. Manji fazni razmaci su kompenzirani manjim razmacima između uporišnih točaka, tako da je došlo samo malo do smanjenja kratkospojne čvrstoće.



Slika 10. Dispozicija 420 kV postrojenja vanjske izvedbe s raspodijeljenim poljima i trostrukim sustavom glavnih sabirnica

6. ZAKLJUČCI

Stalni porast nazivnih struja i struja kratkih spojeva uzrokuje problem s mehaničkim i termičkim naprezanjima komponenti postrojenja i vodiča, spojnog i ovjesnog pribora, izolatora, aparata, nosivih konstrukcija i temelja. Navedeno se odnosi na već izgrađena postrojenja, kao i na planirana postrojenja naponske razine 420 kV. Detaljne analize su pokazale da je s relativno malim poskupljenjima izvedbe moguće postići visoki stupanj sigurnosti i pouzdanosti rada postrojenja.

U radu su prikazane metode opterećenja (slučaj 1 i slučaj 2) i pripadajuće vrijednosti dopuštenih naprezanja kakve su se koristile do kraja dvadesetog stoljeća u Njemačkoj, a kasnije su se razvile razne metodologije proračuna koje uzimaju u obzir specifičnosti pojedinih država.

LITERATURA

- [1] R. Dürschner, E. Hemmeter: "Schaltanlagen in Rohrbauweise für 220 bis 400 kV", Siemens Z.44, Heft 1, 1970
- [2] O. Deter, "Berechnung der dynamischen Kurzschlußbeanspruchung von Anlagen mit biegesteifen Stromleitern und elastischen Stützpunkten", Brown Boveri Mitt 62, 1975, p. 99-104
- [3] O. Deter, R. Gibbon, G. Hosemann, N. Stein, "Measurement of short-circuit stresses on rigid conductor busbar systems and comparison of test results", Electra 30, 1973, p. 35 -54
- [4] M. Mathejczyk, N. Stein, "Kurzschlußseilzüge enggebündelter Doppelseile in Schaltanlagen", ETZ-A 97, 1976
- [5] VDE 0103 - VDE Leitsätze für die Bemessung von Starkstromanlagen auf mechanische und thermische Kurzschlußfestigkeit, Berlin, svibanj 1974.
- [6] G. Palante, "Behaviour of rigid conductors and their supports under short - circuit condition; comparison of calculated and measured values", CIGRE Report 23, 1976
- [7] D. Tsanakas, "Auf Leiter in Einebenenordnung wirkende elektromagnetische Kurzschlußkräfte", Tech. Hochschule Darmstadt, Inst. für el. Energieversorgung, Bericht P 18/3, 1975
- [8] IEC Recommendation Publ. 56-3.3 edition - High voltage alternating current circuit breakers, Bureau Central de la CEI, Geneve
- [9] D. Tsanakas, "Ströme, Kräfte und mechanische Beanspruchung bei nicht gleichzeitig eintretenden Kurzschlüssen", ETZ-A 96, 1975, p. 501-505
- [10] VDE0101 - Bestimmungen für das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, Verband Deutscher Electrotechniker, Berlin, VDE Verlag, travanj 1971
- [11] VDE0210 - Bestimmungen für den Bau von Starkstrom-Freileitungen über 1 kV, Verband Deutscher Electrotechniker, Berlin, VDE Verlag, svibanj 1969
- [12] DIN 1050 - Stahl im Hochbau. Berechnung und bauliche Durchbildung, Deutscher Normen ausschluß Berlin, Beuth Vertrieb, lipanj 1968.
- [13] O. Deter, A. Terhorst, N. Stein, W. Lehmann, W. Rameil, "Influence of the Prospective Very High Load and Short-circuit Currents on Outdoor-substation Design for the Highest System Voltage on the German Interconnected Grid", Report 23-05, 1976
- [14] L. Kattein, S. Kühnel: "Hochstspannungs - Schaltanlagen in Rohrbauweise, AEG - Telefunken 61, 1, 1971

