

mr. sc. Božidar Filipović-Grčić, dipl. ing.
Igor Ivanković, dipl. ing.
Robert Vlajčević, dipl. ing.
HEP – Prijenos, Prijenosno područje Zagreb

B5 – 06

ZAŠTITA OD GUBITKA SINKRONIZMA U PRIJENOSNOJ MREŽI

SAŽETAK

Iznenadni događaji u elektroenergetskom sistemu poput naglih i velikih promjena opterećenja ili kvarova koji se kasno isključuju, uzrokuju oscilacije koje su poznate kao njihanje snage. Njihanje snage u konačnici može dovesti do gubitka sinkronizma na prijenosnim koridorima ili dijelovima sistema. Posljedice toga su neselektivna isključenja i u mogući raspadi dijelova ili cijelog sistema. Primjena zaštite od gubitka sinkronizma u prijenosnoj mreži jedan je od načina sprečavanja tih scenarija.

Ključne riječi: Zaštita prijenosne mreže, zaštita dalekovoda, gubitak sinkronizma

OUT OF STEP PROTECTION IN THE TRANSMISSION NETWORK

SUMMARY

Sudden and huge changes of the power system load or lately switched of the fault in the power system caused an oscillations who a well known like power swinging. This can finally make an out of step conditions in the transmission corridors or in the part of the system. Unselective tripping can happened or we can have drastic cases like partly blackout or blackout in the entire system. Out of step protection in the transmission grid is the one of the very effective measurement to suppress this scenario.

Key words: Transmission network protection, line protection, loss of synchronism

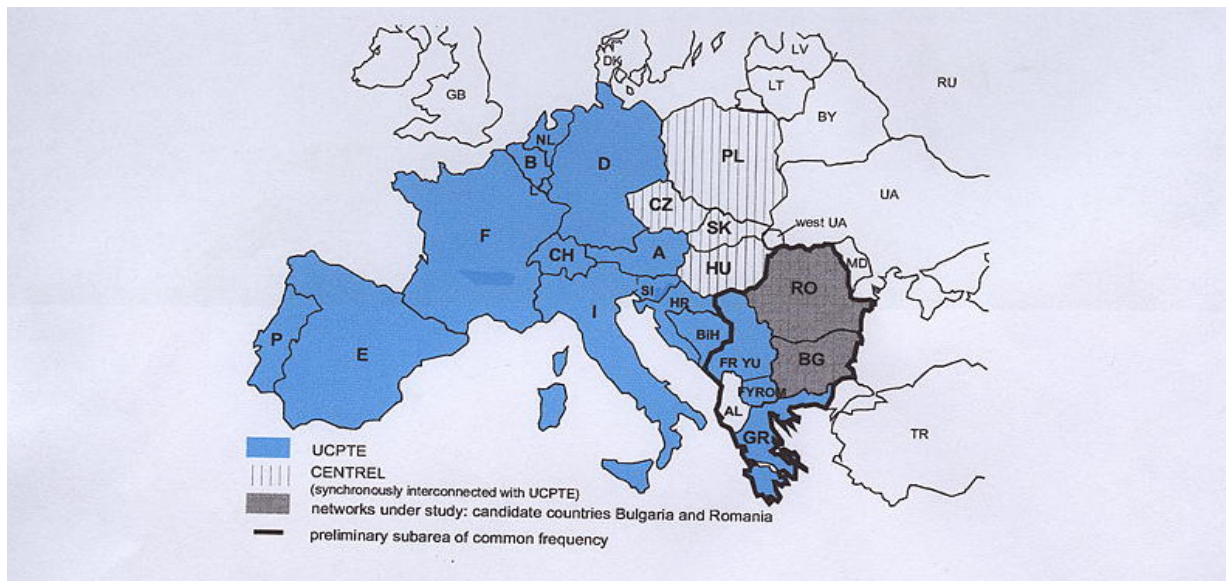
1. UVOD

Povezivanje elektroenergetskih sistema u jugoistočnoj i istočnoj Europi sa sinkronom cjelinom UCTE/CENTREL u tijeku je već nekoliko godina, slika 1. U Hrvatskoj su to projekti izgradnje TS Žerjavinec i TS Ernestinovo, te veze između Hrvatske i susjednih država. Potrebno je pripremiti i nove i stare objekte, što podrazumijeva ugradnju primarne opreme i visokosofisticirane sekundarne opreme upravljanja, zaštite, te naprednih komunikacijskih sustava.

2. SISTEMSKA ZAŠTITA KAO DIO PLANA OBRANE EES-A

U više europskih elektroenergetskih sistema u punoj funkciji je tzv. "Plan obran", to je sistem mjera kojima se nastoji spriječiti poremećaje ili njihove posljedice u svrhu očuvanja sigurnog rada EES-a. Dakle po nastupu poremećaja, sistemi zaštite i upravljanja nastoji spriječiti degradaciju sistema, te ga

pokušavaju vratiti u normalno stanje i minimizirati nastalu štetu. Postoji niz različitih rješenja koja ovise o pojedinoj zemlji i stupnju tehnološkog razvitka, također oni se razlikuju i po broju funkcija. Svima im je zajedničko korištenje visoko razvijenih komunikacija i SCADA sustava.



Slika 1. Planirane interkonekcije u Europi

U sklopu priprema za ostvarenje europske energetske interkonekcije, za potrebe UCTE-a napravljeno je više analiza stanja, scenarija i plana obrane svakog pojedinog sistema i sistema u cjelini. Prijenosni sistem u Hrvatskoj morao bi biti posve spreman za spomenute interkonekcije s kvalitetnim planom obrane.

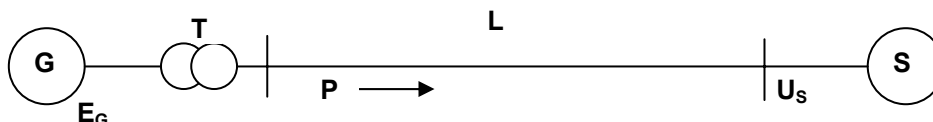
U svim materijalima naglašava se, važnost isključivanja kvarova i poremećaja u vremenu manjem od 100 ms, te kako je potrebno imati na raspolaganju sigurnu komunikaciju za potrebe zaštite. Dulje vrijeme otklanjanja kvara može dovesti u pitanje stabilnost sustava. Neka proračunata vremena kritičnog otklanjanja kvara za planirane interkonekcije, su samo 155 ms, u protivnom može se dogoditi pojava asinkronog pogona čitave regije. Preporuka je, deaktiviranje funkcije njihanja snage odnosno ugradnje releja za gubitak sinkronizma na dalekovodima. Preporuka navodi potrebu postojanja zaštite od zatajenja prekidača kao ključne karike za isključenje kvara. To su načini koji bi donekle omogućili očuvanje elektroenergetskog sistema, u protivnom će se dogoditi djelomični raspadi sistema u regiji.

3. GUBITAK SINKRONIZMA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

3.1. Statička stabilnost

Statička stabilnost se može objasniti na primjeru dvostrojnog modela prikazanog na slici 2. Prikazan je generator G koji preko blok transformatora T i dalekovoda L priključenog na elektroenergetski sistem S. Snaga sistema S je puno veća od generatora G (kruta mreža).

Ako postepeno povećavamo radnu snagu P koja se predaje na dalekovod, to će kod posve određene veličine doći do narušavanja stabilnosti i generator G će izgubiti sinkronizam u odnosu na elektroenergetski sistem S [3].



Slika 2. Primjer dvostrojnog modela

Maksimalna snaga, koja pri sporom povećavanju može biti predana u elektroenergetski sistem, naziva se granicom statičke stabilnost. Aktivna snaga koju generator G predaje u sistem S, je;

$$P = U_S \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

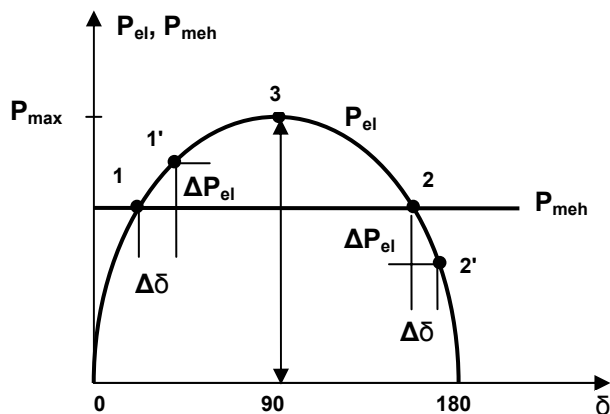
odnosno jednačba za prijenos snage po dalekovodu je;

$$P = \frac{E_G \cdot U_S}{X_{rez}} \cdot \sin \delta \quad (2)$$

uvrštenjem P_{max} dobivamo izraz (3);

$$P = P_{max} \cdot \sin \delta \quad (3)$$

Grafički prikaz jednačbe (3) predstavlja sinusoidu koja ima maksimum za $\delta = 90^\circ$, slika 3.



Slika 3. Ovisnost radne snage o kutu prijenosa

Stabilni dio radne karakteristike, je lijevi dio sinusoide za kutove od 0° do 90° . Desni dio sinusoide za kutove veće od 90° je nestabilni dio. Prijelaz u taj dio obično je praćeno narušavanjem stabilnosti. Na slici 3 osim električne snage P_{el} pokazana je također i snaga razvijena turbinom P_{meh} . Ta snaga zavisi od količine pogonskog medija turbine (para ili voda) i ne zavisi od kuta δ pa je na dijagramu pokazana ravnom linijom. U uravnoteženom radu, turbo ili hidrogeneratora mehanička snaga turbine i električna snaga generatora su uravnotežene,

$$P_{el} = P_{meh} \quad (4)$$

čemu odgovaraju točke 1 i 2 s dijagrama na slici 3. Ako u pogonskoj točki 1 dođe do iznenadnog povećanja $\Delta\delta$ (točka 1') doći će do povećanja električne snage na ΔP_{el} . Kako je P_{meh} ostala jednaka, to će snaga ΔP_{el} biti veća pa će djelovati na kočenje rotora. To će dovesti do smanjenja kuta i vraćanju u režim točke 1. Na taj će se način u razmatranom slučaju ravnoteža $P_{el} = P_{meh}$ ponovno će se uspostaviti što je znak stabilnosti. Analogno će se dešavati uspostavljanje ravnoteže kod smanjenja kuta za $\Delta\delta$. Kod rada u režimu točke 2 i povećanju kuta za $\Delta\delta$ (točka 2') električna snaga će se smanjiti pa će doći do viška snage turbine ΔP_{meh} koja će djelovati na ubrzanje rotora. To će dovesti do povećanja kuta δ i viška snage turbine, te će generator izgubiti sinkronizam. Zato je pogon u točki 2 nestabilan pa se ta točka nalazi izvan radnog područja. Točka 3 odgovara P_{max} (kod $\delta = 90^\circ$) i to je granica statičke stabilnosti. No, raditi na granici statičke stabilnosti nije moguće, jer bilo kakvo povećanje opterećenja u sistemu, uzrokuje prijelaz u nestabilno radno područje i gubitak sinkronizma. Zato se za svaki električni prijenos određuje maksimalno dozvoljeni tok snage P_{dop} određenog pomoću koeficijenta rezerve statičke stabilnosti;

$$k_{rez.stat.stab} = \frac{P_{max} - P_{dop}}{P_{dop}} \quad (5)$$

Računajući i na moguće poremećaje u tokovima snage (neregulirana kolebanja) $\Delta P_{n.k.}$ koji se sumiraju k osnovnom toku i povećavaju ga, koeficijent rezerve statičke stabilnosti određuje se izrazom,

$$k_{rez.stat.stab} = \frac{P_{max} - P_{dop} - \Delta P_{n.k.}}{P_{dop}} \quad (6)$$

Koeficijent rezerve statičke stabilnosti pokazuje koliko dopušteni tok snage treba biti manji od maksimalnog što bi osiguralo statičku stabilnost prijenosa kod promjene opterećenja u pogonu. Prema proračunima i iskustvima iz održavanja i korištenja [2], usvojeni su slijedeći koeficijenti rezerve statičke stabilnosti. U normalnom režimu koeficijent rezerve statičke stabilnosti prijenosnih dalekovoda koji povezuju elektrane s elektroenergetskim sistemom odnosno dalekovodi koji povezuju dva elektroenergetska sistema ne smije biti manji od 20%. U kratkovremenom poslijekvarnom stanju dozvoljava se sniženje koeficijenta rezerve statičke stabilnosti do 8%. Sniženje koeficijenta rezerve statičke stabilnosti od 5% do 10 % dozvoljava se također i u normalnom pogonu, ako je to neophodno kako se ne bi ograničavali korisnici ili zbog čuvanja hidropotencijala. Prema izrazu (6) i računajući s potrebnom rezervom statičke stabilnosti najveći dozvoljeni tok snage na dalekovodu odnosno prijenosnom koridoru određuje se izrazom;

$$P_{dop} = \frac{P_{max} - \Delta P_{n.k.}}{k_{rez.stat.stab.} + 1} \quad (7)$$

gdje je $k_{rez.stat.stab.}$ - koeficijent rezerve statičke stabilnosti.

Veličina $\Delta P_{n.k.}$ zavisi od snage povezanih elektroenergetskih sistema i određuje se izrazom;

$$\Delta P_{n.k.} = k \cdot \sqrt{P_1} \quad (8)$$

gdje je P_1 snaga manjeg elektroenergetskog sistema, a $k = 1,1$ do $1,7$.

3.2. Dinamička stabilnost

Kod kratkog spoja u mreži, što ima za posljedicu veliko sniženje napona, dolazi do brzog smanjenja električne snage generatora. U normalnim uvjetima snaga se predavala po sinusoidi I, slika 4, radna točka je bila točka 1 i kut δ_0 . U trenutku kratkog spoja, električna snaga će se smanjiti, te je karakterizirana sinusoidom II, a radna točka će se preseliti u točku 2.

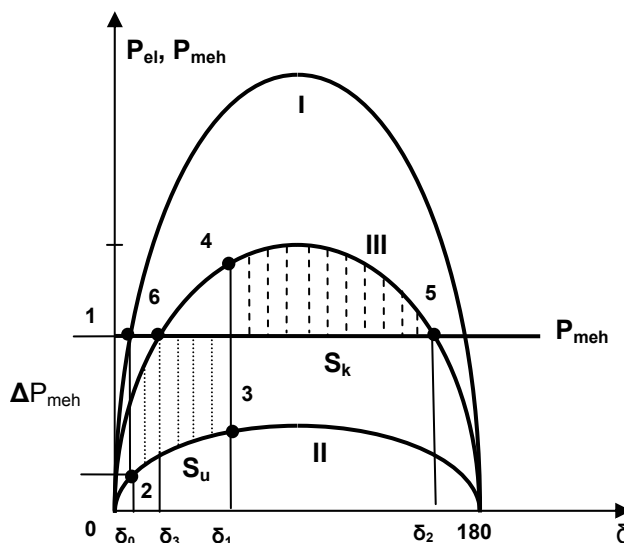
Regulatori brzine vrtnje turbine djeluju s određenim kašnjenjem. Zato kad se javi kratki spoj, snaga proizvedena turbinom ostaje nepromijenjena. Posljedica narušene ravnoteže između P_{el} i P_{meh} javlja se višak snage turbine ΔP_{meh} pod čijim djelovanjem rotor agregata se počinje ubrzavati i kut δ odgovarajuće raste. U vremenu do isključenja kratkog spoja, kut δ uspijeva porasti do veličine, npr., jednake δ_1 , a rotor je sakupio kinetičku energiju, čija je veličina proporcionalna površini S_u , zvanog površina ubrzavanja. U trenutku isključenja kratkog spoja, točka 3 električna snaga raste te postane veća od snage turbine što je na dijagramu karakterizirano točkom 4. Maksimalna električna snaga u poslijekvarnom pogonu bit će manja nego u normalnom pogonu, jer će poslije isključenja dalekovoda rezultirajući otpor prijenosa porasti. Na slici 4 električna snaga poslijekvarnog pogona je prikazana sinusoidom III. U točki 4 počinje proces kočenja rotora koji će trajati do trenutka kad će se u potpunosti potrošiti rezervna kinetička energija rotora. Taj proces karakteriziran je površinom S_k , koju nazivamo površina kočenja. Ako se kinetička energija rotora potroši pri kutovima δ kod kojih $P_{el} > P_{meh}$ tj. do točke 5 i kuta δ_2 na slici 4, to će generator, odnosno sistem ostati u sinkronizmu i dinamička stabilnost bit će sačuvana. Novo stabilno stanje karakterizira se točkom 6, te je uvjet čuvanja dinamičke stabilnosti;

$$S_k > S_u \quad (9)$$

ako taj uvjet nije ispunjen, generator će izgubiti sinkronizam. Slika 4 pokazuje kako dinamičku stabilnost određuju slijedeći faktori:

- Vrsta i mjesto kratkog spoja ovisi veličina propada napona na sabirnicama elektrana i smanjenja električne snage. Najopasniji je trofazni kratki spoj na sabirnicama ili blizu sabirnica elektrana, jer u tom slučaju napon i snaga, mogu se smanjiti do nule. Najmanje opasan je jednofazni kratki spoj. Trajanje kratkog spoja određuje veličinu kuta do kojeg će se ubrzavati generator. Duži kratki spoj znači, veća površina ubrzavanja i manja površina kočenja, te obratno. Ranije isključivanje kratkog spoja, prije zaustavlja ubrzavanje generatora i počinje njegovo kočenje. Zato se svi ključni dalekovodi prijenosa opremaju s dvostrukim brzim jednoperiodskim zaštitama i dvoperiodskim prekidačima.
- Opterećenje generatora u pogonu prije kratkog spoja, određuje početni kut δ_0 . Uz veću opterećenost generatora više će biti postavljena linija snage turbine P_{meh} na slici 4 i tim će biti veća veličina ΔP_{meh} , koja se ubrzava rotore generatora. Zato povećanje opterećenja dovodi do povećanja površine ubrzavanja i smanjenja površine kočenja. Na dijagramu se vidi

da se sprečavanje narušavanja dinamičke stabilnosti može postići brzim smanjenjem snage turbine kod pojave kratkog spoja, što se osigurava pomoću posebnih uređaja (Power Load Unbalance ili slično).



Slika 4. Ovisnost prijenosa za normalni, kvarni i poslijekvarni pogon

- c) Poslijekvarni pogon zavisi od mjesta pojave kratkog spoja i broja isključenih dalekovoda odnosno elemenata mreže. To povećava otpor prijenosa (impedancije sistema) i odgovarajuće se snižava maksimalna snaga i cijela karakteristika električne snage (sinusoida III na slici 4).

3.3. Gubitak sinkronizma

Za razumijevanje pojave gubitka sinkronizma potrebno je razumjeti pojmove statičke i dinamičke stabilnosti koji se mogu pojaviti na prijenosnim dalekovodima ili koridorima. Gubitak sinkronizma je poremećaj koji može prouzročiti ozbiljne i široko rasprostranjene posljedice u sistemu, njega je najteže iskontrolirati zbog izuzetno kratkog vremena za reakciju. Gubitak sinkronizma poprima formu vrlo velikih oscilacija, na proizvodnim jedinicama i na prijenosnim dalekovodima. Nastanak gubitka sinkronizma najčešće nastupa uslijed preopterećenih koridora, odnosno nekorektnog isključenja kratkog spoja. Kada se ovako nešto dogodi u sistemu, tada je potrebna brza i drastična akcija dijeljenja prijenosne mreža u svrhu očuvanja stabilnosti barem u jednom njenom dijelu. U dijelu koji je odveden u otočni rad tada mora nastupiti efikasna akcija rasterećenja sustava po kriteriju frekvencije i napona, kako bi se otočni dio sistema mogao zadržati u pogonu. Akcije dijeljenja sistema provode se u unaprijed zadanim točkama dijeljenja elektroenergetskog sistema. Nalog za dijeljenje mreže mora se provesti u ekstremno kratkom vremenu, jer se gubitak sinkronizma događa u vremenu od svega nekoliko perioda. Osnovni kriteriji za ovakvu vrstu akcije su sljedeći;

- dijeljenje elektroenergetskog sistema u "električne homogene" cjeline, gdje svaka cjelina ima nekoliko proizvodnih jedinica koje se ponašaju isto pri nastupu pojave gubitka sinkronizma,
- sigurnu detekciju bilo kakvog gubitka sinkronizma,
- izdavanje komande na unaprijed zadanim mjestima za dijeljenje sistema, kao i istovremeno izdavanje komandi za rasterećenje,

ovo su osnovni kriteriji na kojima se temelji akcija dijeljenja sistema, a vremena za takvu akciju ima vrlo malo. U normalnom pogonu generatori i sistemi spojeni u paralelni rad rade sinkrono. Sinkroni pogon odlikuje se time što svi generatori i sistemi imaju jednaku frekvenciju i njihovi vektori se okreću istom kutnom brzinom. Asinkroni pogon generatora prema elektroenergetskom sustavu ili jednog sistema prema drugom (drugima) javlja se kod narušavanja stabilnosti paralelnog rada. Asinkroni pogon se može pojaviti kod nesinkronog uključivanja dalekovoda koja spaja elektranu s elektroenergetskim sistemom ili kod spajanja dva sistema. Asinkroni pogon prate sljedeće značajke.

3.3.1. Periodske promjene kuta

U normalnom pogonu vektori napona generatora i elektroenergetskog sistema, rotiraju sa sinkronom kutnom brzinom ω_{nom} i kut između njih δ proporcionalan je radnoj snazi predavanoj po dalekovodu. Kod narušavanja stabilnosti paralelnog rada, prekida se predaja radne snage generatora u elektroenergetski sistem, a kako je snaga turbine ostala ista, povećava se frekvencija okretanja turbine i generatora. U elektroenergetskom sistemu dolazi do obrnutog procesa, javlja se deficit snage i generatori, koji rade u elektroenergetskom sistemu, smanjuju frekvenciju rotiranja. Zato se frekvencija napona elektroenergetskog sistema smanjuje, zato se vektori napona generatora i elektroenergetskog sistema okreću s raznim frekvencijama, dolazi do pojave klizanja.

$$\omega_k = \omega_G - \omega_S \quad (10)$$

$$f_k = f_G - f_S \quad (11)$$

gdje je ω_k i f_k kutna brzina i frekvencija klizanja:

ω_G i f_G kutna brzina i frekvencija napona generatora;

ω_S i f_S kutna brzina i frekvencija napona elektroenergetskog sistema. Obično se klizanje izražava u Hz ili u postocima od nominalne frekvencije:

$$f_{k\%} = \frac{f_k}{f_{nom}} \cdot 100 = 2 \cdot f_k \quad (12)$$

gdje je f_{nom} nominalna frekvencija (50 Hz).

Prvi karakteristični znak asinkronog pogona je periodična izmjena kuta između nesinkroniziranih napona od 0 do 360° s frekvencijom klizanja. Tokom asinkronog pogona frekvencija klizanja nije stabilna, već se mijenja. Frekvencija napona generatora se smanjuje pod djelovanjem regulatora frekvencije okretanja turbina koji nastoji uspostaviti normalnu frekvenciju okretanja, a time i normalnu frekvenciju napona generatora. Frekvencija napona elektroenergetskog sistema se povećava, jer u njoj dolazi do "mobilizacije" rezerve aktivne snage, a kad je nužno i do ograničenja potrošnje. Početna frekvencija klizanja je manja od frekvencije na kraju klizanja, te se kreće od 2 do maksimalnih 10 Hz (za 50 Hz sistem), ovo su iznosi karakteristični za vezu generator-sistem. Za spojne interkonekcijske dalekovode malo teže nastupa slučaj gubitka sinkronizma, ali je moguć u slučajevima velike neravnoteže između proizvodnje i potrošnje, odnosno kasnog otklanjanja kvara, tada su maksimalne frekvencije klizanja nešto niže, do 8 Hz.

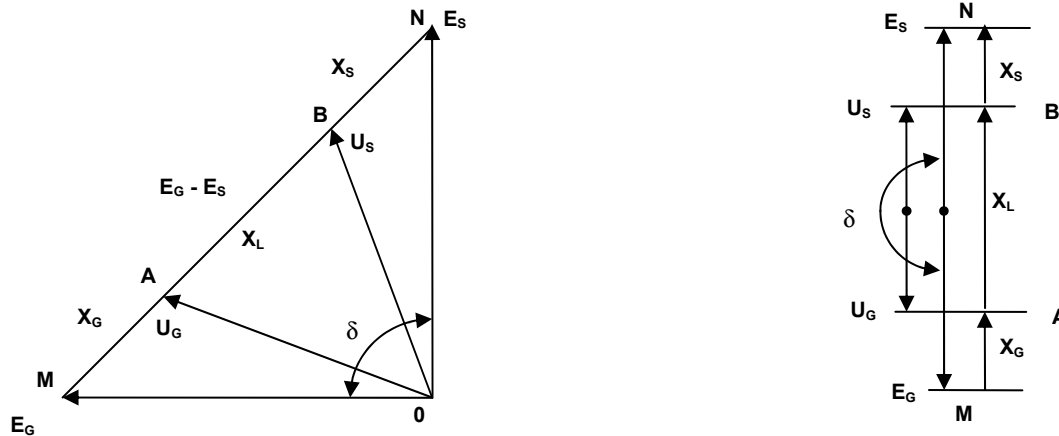
3.3.2. Periodske promjene napona

Razmotrimo proces mijenjanja napona u nekim karakterističnim točkama elektroprijenosa kod asinkronog režima, računajući da je vektor \vec{E}_S statičan dok se vektor \vec{E}_G okreće prema \vec{E}_S s frekvencijom okretanja odgovarajućoj frekvenciji klizanja f_k i da su ems po veličini jednaki, tj. $E_G = E_S$.

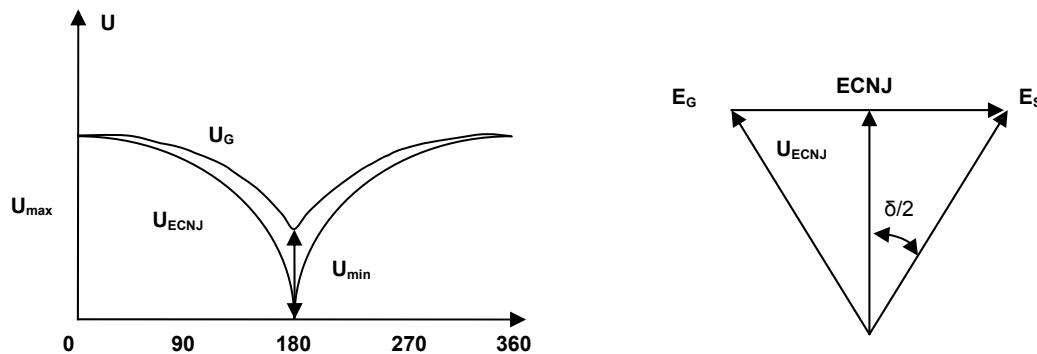
Za slučaj kad vektor \vec{E}_G prethodi vektoru \vec{E}_S za 90° (slika 5.a). Vektor MN, koji spaja krajeve vektora \vec{E}_G i \vec{E}_S predstavlja razliku između tih ems. Veličina razlike ems jednaka je sumi padova napona na X_G , X_L , X_S od struja I koje prolaze kroz njih:

$$\vec{E}_S - \vec{E}_G = j\vec{I}X_G + j\vec{I}X_L + j\vec{I}X_S \quad (13)$$

Stavimo te padove napona na linije vektora MN, dobit ćemo točke A i B koje odgovaraju sabirnicama elektrane i sabirnicama prijemnog elektroenergetskog sistema. Vektori izvedeni od početka dijagrama 0 do točaka A i B su vektori napona na sabirnicama elektrane U_G i sabirnicama sistema U_S . Kod daljnjeg okreta vektora \vec{E}_G u odnosu na vektor \vec{E}_S , naponi \vec{U}_G i \vec{U}_S se mijenjaju. S vektorskog dijagrama na slici 5.b vidi se da kod kuta između \vec{E}_G i \vec{E}_S od 180° naponski vektori \vec{U}_G i \vec{U}_S poprimaju nove položaje i mijenjaju se po veličini. Promotrivši nekoliko vektorskih dijagrama kod raznih kuteva između \vec{E}_G i \vec{E}_S možemo se uvjeriti da se naponi u raznim točkama prijenosa periodski mijenjaju od maksimalne do minimalne veličine. Na slici 6 prikazan je kao primjer dijagram izmjene napona na sabirnicama generatora U_G za jedan period asinkronog režima. Na promatranom prijenosu postoji karakteristična točka u kojoj napon, kod kuta $\delta = 180^\circ$, pada na 0. Ta se točka naziva električki centar njihanja (ECNJ). Karakter promjene napona u ECNJ također je prikazan na vektorskom dijagramu slike 6.



Slika 5. Vektorski prikaz napona i ems (uz $\vec{E}_S = \vec{E}_G$)
a - kod kuta između ems $\delta = 90^\circ$; b - kod kuta između ems $\delta = 180^\circ$;



Slika 6. Mijenjanje napona u procesu asinkronog pogona i
vektorski dijagram za određivanje napona u ECNJ, uz $\vec{E}_S = \vec{E}_G$

Napon u ECNJ kod jednakih $E_G = E_S$ za bilo koji kut δ može se odrediti na osnovu vektorskog dijagrama na slici 6. Kod $E_G = E_S = E_{ECNJ}$ smješten je u sredini vektora $\vec{E}_G - \vec{E}_S$. Zato vektor napona u ECNJ \vec{U}_{ECNJ} dijeli kut δ na pola i zato možemo napisati, odnosno razlika ems je,

$$U_{ECNJ} = E \cdot \cos \frac{\delta}{2} \quad (14)$$

$$\vec{E}_G - \vec{E}_S = 2 \cdot E \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (15)$$

Kod jednakosti ems $E_G = E_S$ reaktancije X'_{ECNJ} i X''_{ECNJ} do ECNJ obih ekvivalentnih ems su jednaka i iznose:

$$X'_{ECNJ} = X''_{ECNJ} = \frac{X_G + X_L + X_S}{2} = \frac{X_{rez}}{2} \quad (16)$$

Kod nejednakih ems reaktancije s obih strana do ECNJ neće biti jednaki i njihova se veličina određuje slijedećim formulama, od ems E_S i E_G ,

$$X'_{ECNJ} = X_{rez} \frac{E_S}{E_G + E_S} \quad (17)$$

$$X''_{ECNJ} = X_{rez} \frac{E_G}{E_G + E_S} \quad (18)$$

Naponi u bilo kojoj točki prijenosa uz kut $\delta = 180^\circ$ određuje se,

$$U' = E_S \frac{X'}{X'_{ECNJ}} \quad (19)$$

$$U'' = E_G \frac{X''}{X''_{ECNJ}} \quad (20)$$

Kod asinkronog pogona rotiraju, u odnosu jedan na drugi ne samo vektori ems, već i svi vektori napona smještenih na suprotnoj strani u odnosu na ECNJ.

3.3.3. Periodske promjene struje

Struja protjecana u prijenosu kod asinkronog pogona iznosi:

$$I = \frac{\bar{E}_S - \bar{E}_G}{X_{rez}} \quad (21)$$

Uvrštenjem $\bar{E}_S - \bar{E}_G$ iz (15) u taj izraz za slučaj jednakih ems dobivamo,

$$I = \frac{2 \cdot E}{X_{rez}} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (22)$$

Struja asinkronog pogona ovisi od kuta δ između ems. Struja I je nula kad je $\delta = 0^\circ$ i 360° , a dostiže maksimalnu veličinu za $\delta = 180^\circ$. Maksimalna veličina struje asinkronog pogona kod jednakih ems određuje se,

$$I_{max} = \frac{2 \cdot E}{X_{rez}} \quad (23)$$

Kod nejednakih ems ($E_S \neq E_G$) maksimalna veličina struje asinkronog pogona kod kuta 180° određuje se formulom (21). Pritom treba računati da je razlika ems kod kuta 180° jednaka,

$$\bar{E}_S - \bar{E}_G = E_S - (-E_G) = E_S + E_G \quad (24)$$

predznak minus u ems E_G pokazuje da je vektor \bar{E}_G usmjeren suprotno od vektora \bar{E}_S . Uvrštenjem vrijednosti ems iz (21) u (24) dobivamo osnovnu formulu za određivanje maksimalne veličine struje asinkronog pogona, koja se javlja uz kut $\delta = 180^\circ$:

$$I_{max} = \frac{E_S + E_G}{X_{rez}} \quad (25)$$

3.3.4. Periodske promjene radne snage

Zavisnost radne snage od kuta δ određeno je formulom (2) iz koje slijedi da je u asinkronom pogonu, za razliku od napona i struje, koji zavise od polovičnog kuta $\delta/2$, radna snaga zavisi od punog kuta δ . Zato periodsko mijenjanje aktivne snage u asinkronom režimu prolazi s dvostrukom frekvencijom klizanja. Iz tog se vidi da za jedan period asinkronog pogona, za vrijeme kojeg nesinkronizirani vektori napona izvrše jedan prema drugom puni krug od 360° , predznak radne snage se mijenja dva puta. Uz kuteve $\delta = 0^\circ$ do $\delta = 180^\circ$ radna snaga ima jedan predznak i dostiže maksimum kod $\delta = 90^\circ$. Kada je kut $\delta = 180^\circ$ radna snaga mijenja predznak i zadržava ga do $\delta = 360^\circ$, a maksimum dostiže kod $\delta = 270^\circ$. Fizički to znači da generatori elektrane u prvoj poluperiodi klizanja rade u generatorskom režimu, a u drugom u motornom režimu. Zato je srednja aktivna snaga tokom asinkronog pogona veoma mala iz čega slijedi da generator koji izgubi sinkronizam ne daje snagu. Ako je frekvencija ems generatora elektrane E_G , viša od

frekvencije ems elektroenergetskog sistema E_S , to u prvom poluperiodu aktivna snaga ima pozitivni predznak, a u drugom negativni. Ako je frekvencija E_G manja od frekvencije E_S , to će aktivna snaga u prvoj poluperiodi biti negativna, a u drugoj pozitivna.

3.3.5. Resinkronizacija

Iz razmatranog, slijedi da je asinkroni pogon praćen velikim sniženjem napona, pogotovo blizu ECNJ, protjecanjem velikih struja njihanja koje mogu prelaziti struje KS i njihanjima radne snage. Sve to je ozbiljno narušavanje normalnog pogona, opasno za opremu i potrošače. Zato asinkroni pogon mora biti ograničen na 2 do 3 njihaja. Granična dozvoljena dužina asinkronog pogona je 15 do 30 sekundi. Za to vrijeme moraju se poduzeti mjere uspostavljanju sinkronizma. Ako se sinkronizam ne uspostavi, elektroenergetski sistem u kojima se pojavio asinkronizam, mora se razdijeliti na ranije određenim mjestima. Uspostavljanje sinkronizma u procesu asinkronog pogona naziva se resinkronizacija. Asinkroni pogon može biti stabilan ili nestabilan. Kod nestabilnog asinkronog pogona resinkronizacija prolazi bez specijalnih mjera. Kao rezultat djelovanja regulatora frekvencije okretanja turbina, klizanje ne ostaje neizmijenjeno već se koleba od s_{max} do s_{min} prema srednjoj veličini,

$$s_{sr} = \frac{s_{max} + s_{min}}{2} \quad (26)$$

Resinkronizacija se provodi u trenutku jednakih frekvencija, kada krivulja klizanja dostiže nulu ili siječe vremensku os tako da je klizanje tog trenutka jednako nuli pa je zato frekvencija rotacije vektora ems generatora jednaka frekvenciji rotacije vektora ems elektroenergetskog sistema. Proces uvlačenja u sinkronizam obično je praćen sinkronim njihanjima. Određena veličina klizanja kod kojeg se resinkronizacija provodi bez specijalnih postupaka zove se kritično klizanje. Aproximativna veličina kritičnog klizanja [2] procjenjuje se prema,

$$s_{krit} = \frac{0.0565}{\sqrt{T_{j,ekv}}} \quad (27)$$

$$T_{j,ekv} = \frac{T_{j,1} \cdot T_{j,2}}{T_{j,1} + T_{j,2}} \quad (28)$$

gdje je $T_{j,ekv}$ - ekvivalent konstante mehaničke inercije (tromosti);
 $T_{j,1}$ i $T_{j,2}$ su konstante mehaničke inercije spojenih elektroenergetskih sistema.

Na taj način resinkronizacija je osigurana ako je,

$$s_{sr} < s_{krit} \quad (29)$$

Kod pojave stabilnog asinkronog pogona, a također za ubrzanje resinkronizacije kod nestabilnih asinkronih pogona treba provesti izjednačavanje frekvencija u nesinkronim dijelovima sistema. U nizu slučajeva resinkronizacija je, ili nemoguća ili se može provesti tek poslije veoma velikog rasterećenja.

4. PRIMJENA U PRIJENOSNOJ MREŽI HRVATSKE

Sistemske zaštite se standardno uvode u pogon u PrP-u Zagreb u posljednje dvije godine, kao sastavni dio "Plana obrane". Tenderski zahtjev za sisteme relejne zaštite u TS Žerjavinec bio je i uvođenje u operativnu upotrebu trenutno najprihvatljivije i raspoložive funkcije zaštite od gubitka sinkronizma na tržištu. Na spojnim vodovima prema Mađarskoj i Sloveniji, kao i prema slavonskoj i primorskoj regiji ugraditi će se visokosofisticirane procesorske zaštite koje će sadržavati tu funkciju. Te zaštite su dio kvalitetnog plana obrane koji se priprema u Hrvatskoj za sprečavanje širenja bilo kojeg poremećaja. Osnovni cilj ovakvih zaštita je prevencija od raspada, za dijelove mreže ili cijele mreže, te također ubrzanje uspostavljanja normalnog stanja. Potrebno je bilo planirati takvu vrstu zaštite između neovisnih sistema ili njihovih dijelova, budući je moguća pojava asinkronih oscilacija na spojnim vodovima.

Smisao ovakvog rješenja je selektivno isključenje dalekovoda u slučaju gubitka sinkronizma, koji je zapravo ispravan, ali međusistemske mehaničke oscilaciju su nastupile, te je potrebno isključiti dalekovod radi očuvanja i spašavanja barem jednog neovisnog sistema ili njegovog dijela.

Zaštite dalekovoda 400 i 220 kV su udvostručene kako bi se mogli ispuniti prije navedeni kriteriji. Nužno je bilo koristiti visokosofisticirane zaštite koje mogu zadovoljiti u svim slučajevima, čak su neke od njih i posebno prilagođene za tu namjenu. Zaštite rade na principu glavna zaštita 1 i glavna zaštita 2. Konceptija zaštite je slijedeća,

- Zaštita 1 ima tri osnovne funkcije uz niz pratećih, to su funkcije uzdužne diferencijalne zaštite, rezervne distantne zaštite i zaštite od gubitka sinkronizma.
- Zaštita 2 ima tri osnovne funkcije uz niz pratećih, to su funkcije distantne zaštite, njihanje snage i zaštita za sporo razvijajući naponski slom na prijenosnom koridoru ili dalekovodu.

Na taj način dalekovod je šticećen pri svim vrstama poremećaja, što je prije bilo teže ostvarivo na jednostavan način. Ključno je bilo pokriti slučaj istovremenog nastanka njihanja i kvara na dalekovodu, tako je moguće za slučaj nastanka njihanja blokirati distantne funkcije, a dalekovod ostaje nadalje šticećen diferencijalnom zaštitom.

Zaštita gubitka sinkronizma morala je ispuniti sljedeće zahtjeve kako bi se mogla primijeniti u ovakvim složenim slučajevima,

- mora sigurno djelovati na prave slučajeve gubitke sinkronizma,
- mora imati opciju prepoznavanja smjera njihanja, tj. da li je uzrok gubitka sinkronizma da drugom kraju dalekovoda ili u suprotnom smjeru, ovo je ključni kriterij za izdavanje naloga za isključenje dalekovoda,
- brojač njihaja kao još jedan od kriterija za isključenje,
- mjerenja i nadzor impedancije u svakoj fazi posebno, uz kriterij 1/3 ili 2/3 fazna mjerenja,
- nedjelovanje na isključenje prekidača kada je vrijednost struje najveća u slučaju njihanja, kako bi se što manje opterećivao prekidač,
- sigurno treba raspoznati slučajeve koji nisu gubitak sinkronizma, njihanja u toku beznaponske pauze ili sporo razvijajući jednopolni kvarovi, te slično.

5. ZAKLJUČAK

Sistemske zaštite su danas jedan od glavnih pravaca u razvoju novih tehnologija za elektroprivrede, jer bez njih je teško napraviti iskorak u novo područje rada elektroenergetskih sistema. Osim funkcija zaštite, potrebno je zajedno razviti nove funkcije i algoritme upravljanja kao i pouzdane komunikacije. Novi sistemi upravljanja, zaštite i komunikacija strateški će omogućiti veću efikasnost i veće prijenosne kapacitete elektroenergetskih sistema uz veći stupanj sigurnosti rada EES-a.

Proizvodi visoke tehnologije, kakvi su danas procesorski uređaji zaštite i upravljanja su bez sumnje ključni u novoj filozofiji korištenja elektroenergetskih sistema.

LITERATURA

- [1] O. Faucon, L. Dousset, J. Boisseau, Y. Harmand, M. Trotigton, "Coordinated defence plan – an integrated protection system", Symposium, Helsinki, August 1995., pp 200-07.
- [2] "Руководящие указания по противоаварийной автоматике энергосистем (основные положения)", Союзтехэнерго, Москва, 1987.
- [3] ABB, "User's manual, REL561", Version 2.3, ABB Automation Technology Products AB, Västerås, Sweden, Januar, 2003.
- [4] B. Filipović-Grčić, I Ivanković, H. Bulat, Z. Čerina, "Zaštita od ispada iz koraka generatora", Cavtat, studeni 2001. godine
- [5] I. Ivanković, R. Vlačević, H. Bulat, "Funkcije relejne zaštite za sprječavanje naponskog sloma", Cavtat, listopad 2002. godine
- [6] Deutsche Verbundgesellschaft (DVG), Final Report, "Stability of the Synchronously Interconnected Operation of the Electricity Networks of UCTE/CENTREL, Bulgaria and Romania", EU-TEN Study, Heidelberg, Germany, January 2001.