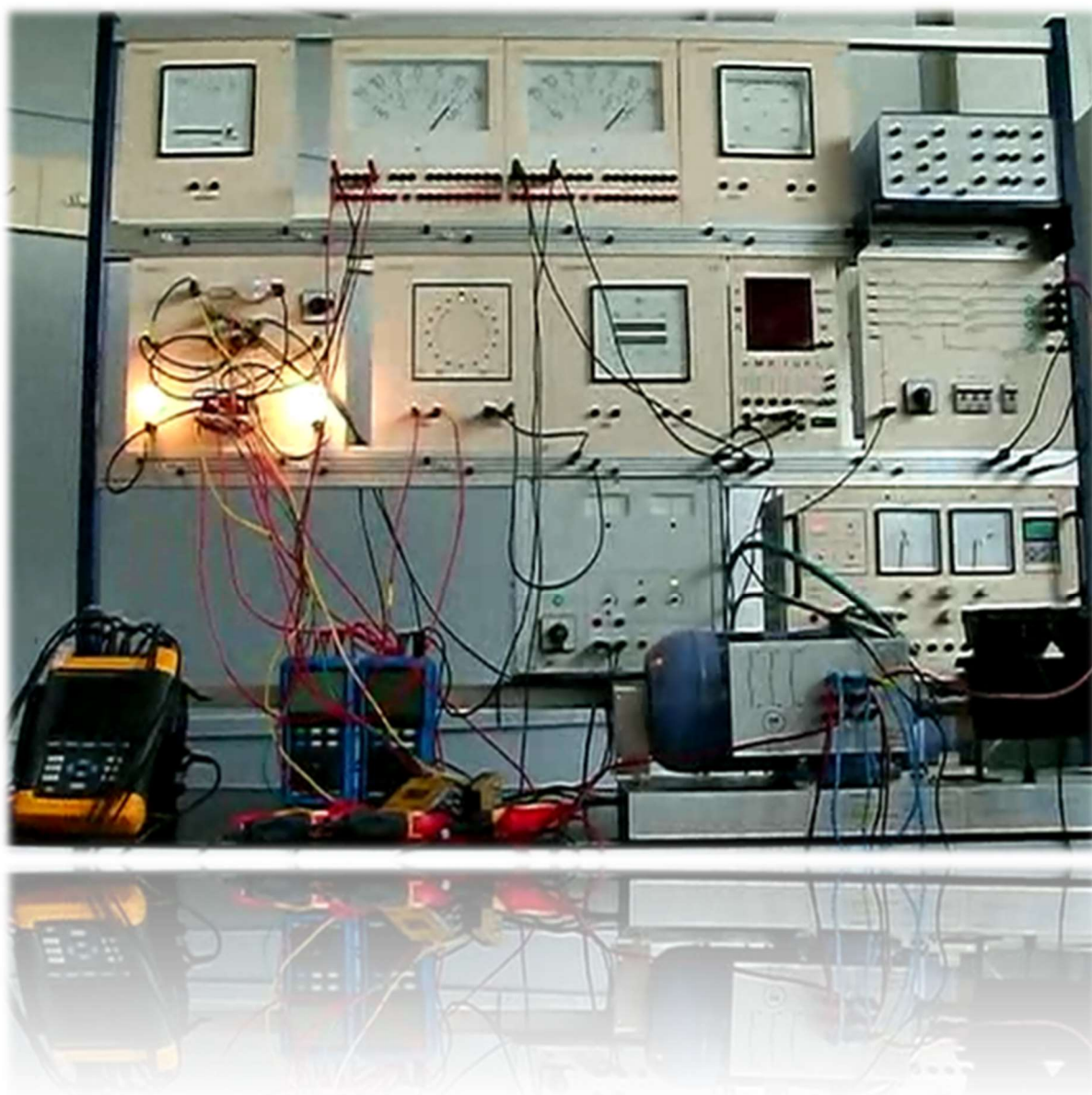


NIKOLA MUSLIM

REGULACIJA U ELEKTROENERGETSKIM POSTROJENJIMA

TEORIJSKA RAZMATRANJA I LABORATORIJSKE VJEŽBE



Sadržaj

OPIS OPREME POTREBNE ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE	10
Zaštitni uređaji.....	10
Napajanje.....	13
Mjerni instrumenti.....	13
Strujna kliješta.....	15
Električni strojevi (generatori i motori)	16
Električni uređaji, sklopni aparati, upravljačke jedinice	19
Jednofazni transformatori.....	21
Trofazni transformatori	22
Grebenaste sklopke za pokretanje motora.....	23
Tipkala.....	23
Sklopnici.....	24
Panel za spajanje sklopnih aparata	24
Uređaji za sinkronizaciju.....	25
Kompensatori reaktivne snage	25
Mjerač otpora izolacije.....	26
Regulatori.....	26
PET PRAVILA SIGURNOSTI	28
1. Isklapanjem odvojiti od napona,	29
2. Sprječavanje ponovnog uklopa	30
3. Utvrđivanje beznaponskog stanja.....	32
4. Uzemljenje i kratko spajanje	33
5. Ograditi mjesto rada od dijelova pod naponom	37
Osobna zaštitna sredstva (engl. PPE – personal protective equipment)	39
Dozvola za rad.....	43
Primjer rada u beznaponskom stanju na naponu iznad 1kV	44
Završetak rada	46
Sažetak pravilnika o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona (NN 5/2010 11.1.2010.).....	47
TEORIJSKA RAZMATRANJA	49
Pregled osnovnih pojmova iz magnetizma.....	49
Električno i magnetsko polje.....	49
Magnetski tok Φ	50
Elektromagnet	50
Magnetičnost željeza, magnetsko zasićenje i petlja histereze.....	51

Magnetsko polje oko dva bliska ravna vodiča	52
Elektromagnetska indukcija	52
Samoindukcija	53
Međuindukcija.....	54
Sila na vodič u magnetskom polju	54
Jednofazni sustavi	55
Trofazni sustavi	55
Transformatori.....	57
Dijelovi transformatora	57
Nazivni podaci.....	58
Idealni transformator	59
Realni transformator.....	62
Korisnost transformatora.....	64
Trofazni transformatori	65
Označavanje stezaljki.....	66
Spojevi namota trofaznog transformatora	67
Specijalni transformatori	70
Strujni mjerni transformatori.....	70
Naponski mjerni transformatori	71
Regulacijski transformatori	72
Elektroenergetski sustav	73
ELEMENTI ELEKTRIČNIH POSTROJENJA.....	75
Izvedbe električnih postrojenja u elektroenergetskom sustavu.....	75
Postrojenja u zgradi (unutrašnja).....	75
Postrojenja s kabelskim odvodom.....	76
Postrojenja s neizoliranim (nadzemnim) odvodom.....	76
Postrojenja na otvorenom (pod vedrim nebom)	76
Oklopljena postrojenja	77
Oklopljena postrojenja bez rastavljača.....	78
Oklopljena postrojenja sa rastavljačima.....	78
Transformatorske stanice na stupu	80
Izbor snage transformatora i broj transformatora s obzirom na ekonomičnost.....	81
Upravljačke ploče, pultovi i ormari.....	83
Kabeli	85
Uzemljenja električnih uređaja.....	87
Struje u postrojenju	90
Koordinacija izolacije	92

Odvodnici prenapona	94
Ventilni odvodnici	94
Iskrišta	96
Cijevni odvodnici	96
Sabirnice.....	97
Izolatori	99
Prekidači i sklopke	104
Uljni prekidači.....	104
Malouljni prekidači	104
Hidromatski prekidači	104
Pneumatski prekidači	104
Rastavljači	105
Osigurači	108
Visokonaponski osigurači	108
Prekidanje struje.....	109
Izbor osigurača	110
Relejni uređaji	111
Prekostrujni relej sa preklopnom kotvom	113
Prekostrujni relej – neusporeni sa pomičnom kotvom.....	113
Prekostrujni neusporeni relej sa okretnom kotvom.....	114
Prekostrujni relej prikazan vagom.....	114
Podnaponski relej	114
Termički relej	115
Načini prorade prekidača	115
Okidanje istosmjernom strujom	115
Okidanje izmjeničnom strujom	116
Okidanje strujom iz naponskog transformatora	116
Okidanje strujom iz strujnog transformatora	116
Diferencijalna zaštita.....	117
Zvezdište transformatora.....	132
PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	137
Trofazni sinkroni generatori	137
Sinkroni generator u elektrani.....	139
Podjela generatora	141
Hlađenje generatora.....	142
Regulacija napona generatora	142
Samouzbudni sinkroni generatori (self excited synchronous generators).....	144

Sinkroniziranje generatora	146
Podjela opterećanja između generatora u paralelnom radu.....	148
Njihanje sinkronih generatora u paralelnom radu	148
Zaštita generatora	151
Diferencijalna zaštita generatora	152
LABORATORIJSKE VJEŽBE – GENERATORI	155
Ciljevi, zadaci i svrha izvođenja vježbi – kratki pregled	155
Snimanje PID karakteristike uzbuđne struje AVR-a i brzine vrtnje pogonskog stroja	156
Istosmjerni paralelni generatori.....	159
Nezavisno uzbuđeni DC paralelni generator.....	160
Samouzbudni DC paralelni generator	161
Istosmjerni serijski generator	162
Istosmjerni kompaundni generator.....	164
Trofazni sinkroni generator - spoj zvijezda	166
Trofazni sinkroni generator – spoj trokut	169
Prednosti spajanja generatorskog namota u spoj zvijezda:	171
Sinkronizacija pomoću duplih instrumenata i nul voltmetra.....	172
Sinkronizacija uz pomoć instrumenata i sinkronoskopa.....	175
Sinkronizacija žaruljama.....	177
Svijetli spoj sa dvije žarulje i dva voltmetra	177
Tamni spoj sa dvije žarulje	179
Sinkronizacija generatora sa dva voltmetra, tri žarulje i sinkronoskopom.....	181
Sinkronizacija generatora sa duplim instrumentima, tri žarulje, sinkronoskopom i nul voltmetrom.....	183
Neispravan redoslijed faza.....	185
Karakteristika praznog hoda sinkronog generatora.....	187
Kratki spoj sinkronog generatora	189
Opterećenje sinkronog generatora.....	191
Regulacijske karakteristike uzbude sinkronog generatora	193
Opterećenje radnim teretom	193
Opterećenje induktivno radnim teretom.....	195
Opterećenje radno kapacitivnim teretima	197
PRIJENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE	200
Sažetak mrežnih pravila prijenosnog sustava (NN 67/2017)	201
Trofazni transformator u elektroenergetskom sustavu	205
Simetrično opterećenje trofaznog transformatora	205
Nesimetrično opterećenje trofaznog transformatora.....	206

Paralelni rad transformatora	208
Metode mjerenja otpora namota.....	208
ZAŠTITA TRANSFORMATORA	208
Zagrijavanje i hlađenje transformatora	209
Diferencijalna zaštita transformatora	210
Zaštita vodova	213
Zaštita od zemljospoja	214
Javljanje zemljospoja	214
Distantni releji	215
Usmjerni releji.....	216
Releji sa usporenim djelovanjem od 0.5 sek.	216
Releji sa usporenim djelovanjem, ali sa različitim odgodama	216
Prekostrujno ovisni releji	217
LABORATORIJSKE VJEŽBE – TRANSFORMATORI U PRIJENOSNOJ MREŽI	218
Trofazni transformator Yd5.....	218
Prazni hod.....	222
Dvofazno opterećenje.....	223
Trofazni transformatori Dy5 i Dyn5	224
Prazni hod.....	229
Jednofazno opterećenje	230
Dvofazno opterećenje.....	231
DISTRIBUCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	233
Sažetak mrežnih pravila distribucijskog sustava (NN 74/2018)	237
Kompenzacija reaktivne snage.....	247
LABORATORIJSKE VJEŽBE – KOMPENZATORI I TRANSFORMATORI U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI.....	251
Kompenzacija jalove snage.....	251
Kompenzacija reaktivne snage u mreži –izbor kompenzatora.....	252
Spoj kondezatora u zvijezdu	252
Spoj kondenzatora u trokut	253
Automatsko kompenziranje reaktivne snage u EES	254
Mjerenje struje, snage i faktora snage u slučaju nadkompenzacije u EES	256
Slijedno i povratno uključivanje kompenzatora.....	259
Automatska kompenzacija u sustavu trofaznog trošila sa induktivnim i radnim trošilima	261
Trofazni transformator Yz5	263
Prazni hod.....	267
Jednofazno opterećenje	268

Dvofazno opterećenje.....	268
TROŠILA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU	270
Trošila na mrežnom naponu 400V , 50Hz.....	270
Simetrično trošilo u spoju zvijezda	271
Nesimetrično trošilo u spoju zvijezda	271
LABORATORIJSKE VJEŽBE – TROŠILA U EES	272
Ciljevi, zadaci i svrha izvođenja vježbi – kratki pregled	272
Spoj trofaznog trošila bez nul voda.....	273
Spoj trofaznog trošila sa nul vodom.....	275
Spoj u trokut.....	277
Zvijezda-trokut pokretanje motora.....	280
Poremećaji u trofaznim spojevima.....	282
1. Trošilo bez priključenog nul voda.....	282
1a) Ispad jednog vanjskog voda ili jedne faze trošila	282
1b) Ispad dvaju vanjskih vodiča ili dvije faze kod spoja bez nul voda	284
1c) Kratki spoj u jednoj fazi kod trošila bez priključenog nul voda	285
2. Trošilo sa priključenim nul vodom.....	286
2 a) Ispad jednog vanjskog voda ili jedne faze simetričnog trošila	286
2b) Ispad dvaju vanjskih vodiča ili dviju faza trošila.....	288
3.Poremećaji u trofaznim trokutnim spojevima	290
3a) Ispad jedne faze napajanja	290
3b) Ispad jedne faze trošila.....	293
3c) Ispad dva vanjska voda	293
3d) Ispad dvije faze trošila	294
Nesimetrično trošilo u spoju zvijezda bez nul voda.....	295
Nesimetrično trošilo u spoju zvijezda sa nul vodom.....	298
Nesimetričan spoj trošila u trokut	300
LITERATURA	302

Osiguranje mjesta rada smiju izvoditi samo stručne osobe elektrotehničke struke, ovlaštene i osposobljene za obavljanje ovog posla.

Podučene osobe smiju sudjelovati pri izvođenju osiguranja mjesta rada, ali pod nadzorom stručne osobe.

Kod rada na postrojenjima iznad 1kV, u skućenim prostorima te kod rada na visini obavezno dva kvalificirana radnika obavljaju posao.

Poslodavac je dužan osigurati mjesta rada, pridržavajući se spomenutih općenitih pravila, ali uzimajući u obzir i specifičnosti pojedinih postrojenja. Također, moraju se odabrati osobna zaštitna sredstva (engl. PPE- personal protective equipment).

1. Isklapanjem odvojiti od napona,

Dio postrojenja ili instalacije na kojem će se raditi, mora biti odvojen od svih izvora napajanja. Ako se odvajanje obavlja rastavljačima, tada se prije otvaranja rastavljača strujni krug mora prekinuti prekidačima.



Slika 2.1 Prekidač u položaju ON /OFF

Kod uklopa, redoslijed zahvata je obrnut, prvo se uklapaju rastavljači pa prekidač.

Poslije odvajanja postrojenja rastavljačem, obvezno treba provjeriti jesu li kontakti rastavljača u isključenom položaju.

Ako je postrojenje zatvorenog tipa (limena i druga kućišta), kao i kod daljinskih upravljanih postrojenja, provjera odvajanja od napona izvodi se provjerom položaja upravljačkih elemenata, odnosno pouzdanim povratnim signalima uklopnog stanja.

Dijelove postrojenja, koji su i poslije odvajanja još uvijek pod naponom, primjerice, kondenzatori i kabeli, treba izbiti prikladnim napravama.

2. Sprječavanje ponovnog uklopa

Svi sklopni aparati, koji služe za odvajanje od napona u električnom postrojenju, trebaju biti osigurani od ponovnog uklopa prije početka rada. Preporuča se zaključavanje ili blokiranje pogonskog mehanizma.



Slika 2.2 Zaključavanje prekidača

Ako se za isklup koristi slog osigurača ili linijska sklopka, koja se ulaže zavrtanjem (ili zakretanjem), oni se moraju odstraniti – izvadi i pohraniti na sigurno mjesto ili nadomjestiti slijepim poklopcima, koji se mogu odstraniti samo posebnim alatom, primjerice, ključevima. Ako je za sklapanje potreban pomoćni izvor napajanja, treba isključiti i taj izvor napajanja.



Slika 2.3. Zaključavanje prekidača uz ponoć metalnog nastavka

Treba postaviti i znakove zabrane i tablice upozorenja.

Mora se spriječiti i mogućnost ponovnog uklopa na uređaju za daljinsko ili automatizirano upravljanje, kao i na licu mjesta.

Svi sustavi za signalizaciju i blokade korišteni u spomenute svrhe, trebaju biti pouzdani.



Slika 2.4 Obavijest zabrane uključivanja



Slika 2.5 Zaključavanje uz obavijest o zabrani uključivanja

3. Utvrđivanje beznaponskog stanja

Beznaponsko stanje treba utvrditi na svim polovima električnog postrojenja i instalacija, što je moguće bliže mjestu rada. Ako mjesto rada obuhvaća više međusobno električki razdvojenih dionica, beznaponsko stanje treba utvrditi na svakoj od tih dionica.

Indikatori za utvrđivanje beznaponskog stanja trebaju biti provjereni neposredno prije njihove primjene, ali i nakon korištenja. Za niskonaponske mreže koristimo multimeter, duspol ili ispitivač odvijač (slika 2.5.1.), a za ispitivanje beznaponskog stanja na naponu iznad 1kV koristimo kontaktni i beskontaktni teleskopski ispitivač (slika 2.6.)



Slika 2.5.1. Duspolač, multimeter i ispitivač odvijač

Nije dopuštena primjena improviziranih naprava za provjeru beznaponskog stanja (žarulja sa žarnom niti, »probir lampa« i slično).



Slika 2.6 Visokonaponski ispitivač napona

4. Uzemljenje i kratko spajanje

Na mjestu rada u svim visokonaponskim i u nekim niskonaponskim postrojenjima, svi dijelovi postrojenja na kojima se radi trebaju biti uzemljeni i kratko spojeni. Naprave ili aparati za uzemljivanje i kratko spajanje, ako je ikako moguće, trebaju biti vidljivi s mjesta rada.

Naprave za uzemljivanje i kratko spajanje najprije trebaju biti spojene na uzemljenje čvrstom vezom, a tek nakon toga se izolacijskom motkom ili izolacijskim užetom uzemljuju pojedine komponente.

Redoslijed skidanja naprava je obrnut.



Slika 2.7 Naprava za uzemljivanje i kratko spajanje PAUK (engl. spider)

Ondje gdje se tijekom rada vodiči trebaju rastavljati ili spajati, a postoji opasnost potencijalne razlike na postrojenju, moraju se prekidi ili spajanja izvesti uz prikladne mjere, kao što su izjednačavanja potencijala ili uzemljivanje svake električki odvojene dionice.

U slučaju da neko ipak uključi napajanje nastat će kratki spoj sve tri faze i izbacit će prekidač, a ovisno o iznosu struje kratkog spoja postoji i opasnost od eksplozije prekidača.

Za postavljanje i zavidavanje naprave za uzemljivanje i kratko spajanje koriste se izolacijske motke (slika 2.8.)



Slika 2.8 Izolacijska motka za postavljanje naprave za uzemljivanje i kratko spajanje



Slika 2.10. Izolacijski teleskopski nastavci za postavljanje pauka

Nije dopušteno samovoljno skidanje ili premještanje naprava za uzemljivanje i kratko spajanje. Odobrenje za to može dati voditelj električnog postrojenja, odnosno rukovoditelj radova i to samo za one naprave koje su postavljene pod njegovim nadzorom.

Tamo gdje se za uzemljivanje i kratko spajanje koriste daljinsko upravljani zemljospojnici, položaj prekidača za uzemljivanje mora biti pouzdano dojavljen uređajem za daljinsko upravljanje.

Ako se za kratko spajanje i uzemljenje koristi metalno užadi, duljina užeta ne smije biti manja od 1,2 udaljenosti mjesta priključenja užeta.

Kod usporednog korištenja uređaja za kratko spajanje metalnom užadi, moraju biti ispunjeni sljedeći uvjeti:

- jednaki presjeci užadi,
- jednaka duljina korištenih metalnih užadi,
- jednaki dijelovi za priključenje i priključnice,
- ugradnja aparata (uzemljivača) s međusobnim vrlo malim razmakom, i
- usporednim spajanjem užadi.

Prigodom usporednog spajanja više užadi, za svako užadi mora se pretpostaviti 75 posto dopuštenog strujnog opterećenja. Presjeke usporedno spojenih užadi smije se potpuno opteretiti, ako je sa sigurnošću utvrđeno da će

uže za kratko spajanje biti samo jedanput opterećeno potpunom strujom kratkog spoja. To općenito nastupa kod postrojenja nazivnoga napona višeg od 110 kV.

Dopušteni trajni dodirni napon UL unutar električnih postrojenja iznosi 50 V. Na nadzemnim vodovima s metalnom konstrukcijom stupova, trajno dopušteni dodirni napon iznosi 25 V.

Na neizoliranim vodičima visokonaponskih nadzemnih vodova i visokonaponskih postrojenja, uzemljivanje i kratko spajanje se izvodi sa svih strana mjesta rada i to na svim vodičima koji ulaze na mjesto rada.



Slika 2.11 Uzemljivanje sabirnica prekidača KONČAR

Najmanje jedna od naprava za uzemljivanje i kratko spajanje treba biti vidljiva s mjesta rada.

Kod nadzemnih vodova s izoliranim vodičima, kabela i ostalih izoliranih vodiča, uzemljivanje i kratko spajanje treba izvesti na golim dijelovima na mjestu odvajanja od napona ili, ako je moguće, na obje strane što bliže mjestu rada.

Kod radova na transformatorima, potrebno je više i niže naponsku stranu uzemljiti i kratko spojiti, također, ako niže naponska strana ima napon manji od 1000 V. To vrijedi dosljedno za višenamjenske namote na svim izvedenim izvodima namota.

Kod radova na postrojenjima sa završecima s prirubnicama ili sigurnim kompletima utičnica protiv dodira, na transformatoru najbližem sklopnom mjestu treba izvesti uzemljenje i kratko spajanje. Uzemljenje i kratko spajanje odvojenih utičnih spojnika provodi se postrojenju pripadajućim aparatima i pomoćnim sredstvima.

Osobna zaštitna sredstva (engl. PPE – personal protective equipment)

Osobna zaštitna sredstva su obvezna pri radu sa električnim uređajima, baterijama, rotacijskim strojevima, kod radova na visini, pri radu sa kemikalijama itd.

Udar struje uzrokuje opekotine, otvorene rane, prestanak rada srca, prestanak disanja, smrt.

Za zaštitu od električnog udara, pripadajući dijelovi osobnih zaštitnih sredstava su:

- zaštitna kaciga (slika 68.1.)
- zaštitne naočale ili vizir sa UV filterom (slika 69.)
- zaštita sluha (slika 69.1.)
- zaštitno odijelo (slika 68.)
- zaštitni rukavi (slika 70.)
- zaštitne rukavice (slika 70.1.)
- zaštitne cipele i čizme (slika 71.)
- izolacijski pribor za pritezanje naprave za uzemljivanje i kratko spajanje (slika 63.1)
- izolacijski tepih (slika 67.)
- sigurnosni pojas za rad na visini (slika 72.)
- izolacijska kuka za spašavanje (slika 72.1.)



Slika 2.14 Komplet zaštitne opreme i zaštitno odijelo

Zaštitno odijelo iznutra mora biti izrađeno od netopivog materijala (npr. pamuk). U slučaju velikih temperatura i topljenja materijala u kontaktu sa kožom nastaju ozlijede opasne po život

Sigurnosna elektroizolacijska kaciga je izrađena od izolacijskog materijala i sadrži vizir sa UV zaštitom



Slika 2.15 Sigurnosna kaciga

Primjer rada u beznaponskom stanju na naponu iznad 1kV

Za primjer rada u beznaponskom stanju na opremi nazivnog napona iznad 1kV uzet ćemo ispitivanje valjanosti izolacije transformatora nazivnog napona 7kV.



Slika 2.24 Ispitivanje otpora izolacije namota transformatora nazivnog napona 7kV

Iako je nazivni napon transformatora veći od ispitnog napona uređaja za utvrđivanje ispravnosti (METREL), moguće je ustanoviti ispravnost izolacije na nekoliko načina.

Jedna metoda je određivanje polarizacijskog indeksa (PI indeks). Indeks polarizacije je omjer otpora izolacije nakon 10 minuta i nakon 1 minute.

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1}$$

PI – polarizacijski indeks

R_{10} – otpor izolacije nakon 10 min

R_1 – otpor izolacije nakon 1 min

PI	Stanje
1	Opasno
1 – 1.5	Loše
1.5 – 2.0	Nije preporučljivo
2.0 – 3.0	Može
3.0- 4.0	Dobro
Iznad 4	Odlično

Tablica 1. PI indeks

E – inducirani napon (V)

N – broj zavoja petlje

$\frac{d\phi}{dt}$ – promjena toka u jedinici vremena

U formuli (5) umjesto oznake za promjenu toka u konačnom vremenskom intervalu $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$, koristimo oznaku $\frac{d\phi}{dt}$,

koja označava promjenu toka u vrlo kratkom (beskonačno malom) vremenu (dt – derivat vremena – infinitezimalni dio).

Odnos između konačne promjene $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ i beskonačno male promjene $\frac{d\phi}{dt}$ matematički se opisuje pomoću limesa tj. granične vrijednosti kad se promjena vremena približava nuli.

$$\frac{d\phi}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

U višoj matematici točne vrijednosti se računaju preko integrala koji označava beskonačni zbroj beskonačno malih dijelova (derivata ili infinitezimalnih dijelova).

Nadalje ćemo koristiti ovakav način za prikaz vremenske promjena toka ili drugih veličina.

Iznos induciranih napona je proporcionalan broju zavoja petlje te brzini promjene magnetskog toka.

Predznak minus označava da se inducirani napon protivi narinutom naponu. On je takvog smjera da u zavojnici stvara struju koja se svojim magnetskim tokom suprotstavlja promjeni magnetskog toka zbog kojeg je došlo do induciranih napona.

Samoindukcija

Samoindukcija je pojava da se u zavojnici koja se nalazi u **nekom dijelu strujnog kruga** inducira elektromotorna sila, zbog promjene magnetskog toka izazvane promjenom struje koja teče zavojnicom.

Smjer te elektromotorne sile je takav da nastoji spriječiti promjenu koja ju je izazvala.

Iznos elektromotorne sile ovisi o brzini promjene magnetskog toka.

Najčešće promjene nastaju pri sklapanju.

Svojstvo zavojnice da se odupire promjeni struje koja prolazi kroz nju, naziva se INDUKTIVITET. Induktivitet se ponaša kao tromost jer usporava promjenu struje.

Induktivitet je osnovna vrijednost zavojnice i on ovisi o broju zavoja zavojnice N , duljini zavojnice l , presjeku jezgre zavojnice S i permeabilnosti materijala od kojeg je napravljena jezgra μ_r .

$$L = \frac{N^2}{l} \mu_0 \mu_r S \quad (6)$$

Jedinica za induktivitet je Henri (H).

N – broj zavoja

l – duljina zavojnice (m)

S – presjek zavojnice (m²)

μ_r – permeabilnost materijala

μ_0 – magnetska permeabilnost za vakuum i iznosi $4\pi \cdot 10^{-7}$ (Vs/Am)

Induciranu elektromotornu silu možemo izraziti preko induktiviteta

$$E = -L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

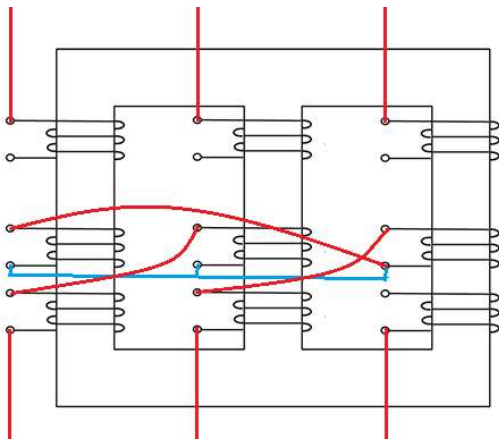
E – inducirani napon (V)

L – induktivitet (H)

$\frac{di}{dt}$ – promjena struje u vremenu

Vidimo da je ovaj napon veći što je veća promjena struje. Zavojnica ima induktivitet 1H ako u njoj jednolika promjena struje od 1A u 1 sekundi inducira napon od 1V.

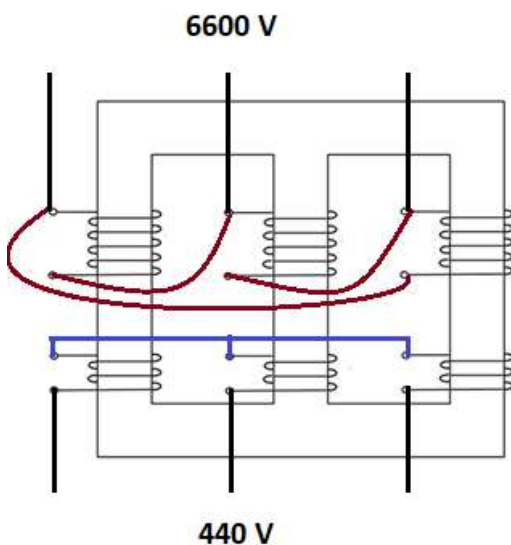
Razlika samoindukcije i elektromagnetske indukcije je u tome što se pri samoindukciji inducira elektromotorna sila u zavojnici koja je protjecana strujom (zavojnica sama sebi stvara napon koji tjera svoju struju koja se opire struji koja



Slika 3.30 Spoj primara u zvijezdu i sekundara u cik-cak, oznaka (Yz)

Uzmimo za drugi primjer brodski distribucijski transformator 6600V/440V. Primarni namoti su najčešće spojeni u spoj trokut radi bolje simetrije na primaru. Važno je da nesimetrično opterećenje na sekundaru ne uzrokuje veću nesimetriju na primaru.

Napomena: Izmjenični naponi brodske mreže iznad 1000V nazivaju se visoki naponi tako da se ne koristi naziv srednjenaponska brodska mreža kao na kopnu. Ispitivanje izolacije na primarnoj strani (visoki napon) vrši se izračunom PI indeksa (polarizacijski indeks). PI indeks je omjer otpora izolacije kojeg izmjerimo u trajanju od 10 minuta i otpora izolacije kojeg mjerimo u trajanju od 1 minute. Vrijednost PI indeksa bi trebala biti iznad 2.

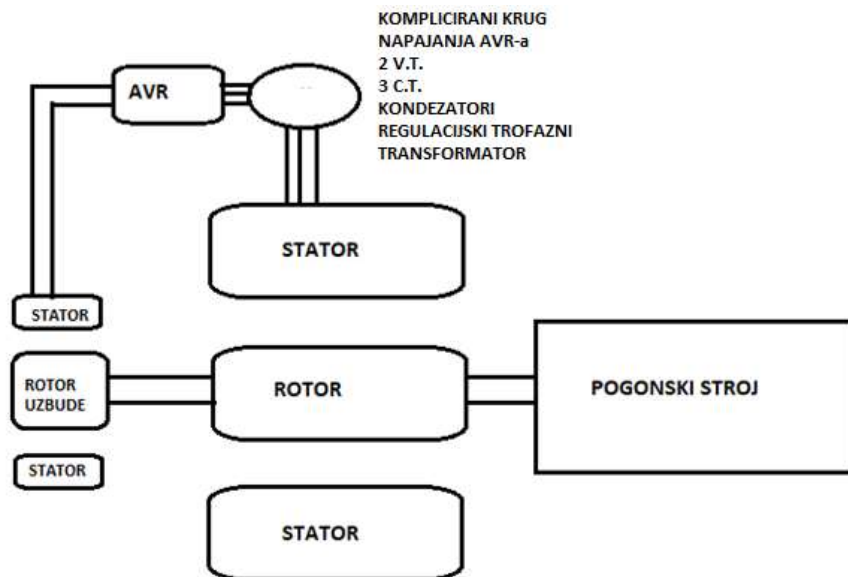


Slika 3.31 Brodski transformator – spoj trokut zvijezda (Dy)

Cjelovita oznaka trofaznog transformatora uključuje uz vrstu spoja i fazni pomak između induciranih istoimenih faza višeg i nižeg napona. Taj je kut uvijek višekratnik kuta 30° . Podijelimo li iznos faznog pomaka (fazni kut) sa 30 dobit ćemo satni broj transformatora.

Npr. spoj Dy5 označava stranu većeg napona u spoju trokut, stranu manjeg napona u zvijezdu, a fazni pomak istoimenih linijskih napona primara i sekundara 150° .

Trofazni transformatori mogu biti spojeni u različite grupe spoja: **Y**, **D** i **Z**. Ovisno o spoju, fazni naponi su međusobno zakrenuti za određeni kut (korak zakreta iznosi 30°). Distributivni transformatori obično imaju spoj Dy ili Yd. Kod mogućeg nesimetričnog tereta (jednofazni potrošači) koristi se spoj Yz. Za paralelni rad oba transformatora moraju imati istu grupu spoja.

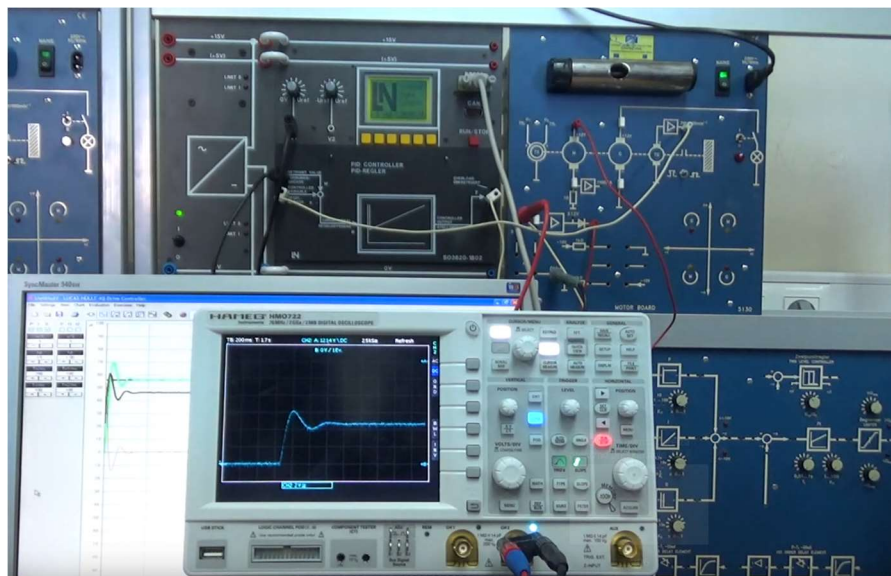


Slika 5.11 Samouzbudni trofazni sinkroni generator

U rotoru uzбудnika nalazi se trofazni namot u kojem se inducira trofazni napon usljed rotacije namota unutar stalnog magnetskog polja statora. Istosmjerna struja iz AVR-a napaja stator uzбудnika i stvara stalno magnetsko polje unutar kojeg se vrti trofazni namot rotora.

Trofazni inducirani napon na rotoru spojen je na trofazni 6 pulsni neupravljivi (diodni) rotirajući ispravljač. Izlaz iz rotora uzбудnika je istosmjerna struja koja napaja glavni namot rotora generatora. Glavni namot rotora je namotan oko istaknutih polova.

Sad se pojača ukupni magnetski tok rotora, a time i inducirani napon na statoru. Proces ide ciklički i napon na generatoru raste po PID karakteristici tako da se dozvoljava jedno nadvišenje napona (overshoot).



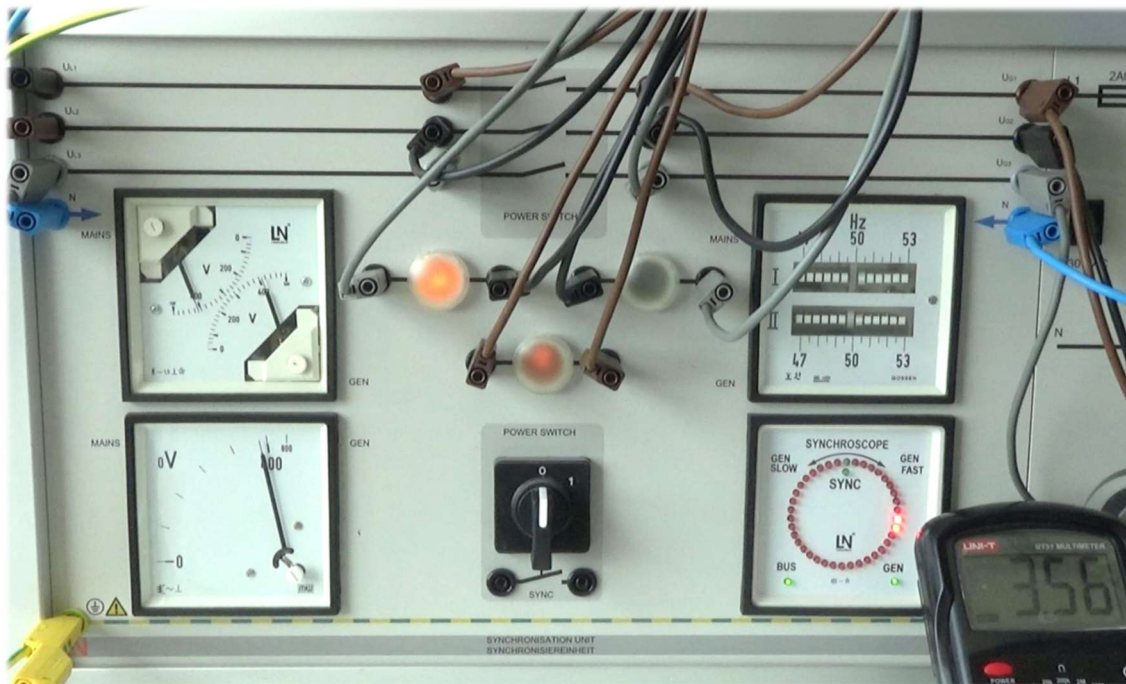
Slika 5.12 PID regulator u primjeni kod AVR i GOVERNORA

Povećavanjem uzbudne struje raste napon na stezaljkama generatora. Na stezaljkama generatora mora biti stalan napon i stalna frekvencija. AVR upravlja iznosom uzbudne struje tj. Iznosom magnetskog polja koje prenosi snagu sa rotora na stator u kojem se indukcijom vrši pretvorba u električku energiju.

PID karakteristika se na sličan način ostvaruje i kod regulacije broja okretaja pogonskog stroja. Povećanjem dotoka goriva pogonskom stroju povećava se brzina rotora koja se treba održavati stalnom radi održavanja stalne frekvencije. Upravljanje dotoka goriva vrši regulator koji se naziva governor.

Ukoliko je generator duže vrijeme bio izvan pogona, razmagnetizirat će se polovi i neće se pojaviti u početku napon indukcije potreban za napajanje AVR-a.

Zbog toga se može dovesti direkto napajanje (iz 9V ili 12V baterije) na stator uzбудnika i time pokrenuti indukciju trofaznog napona u rotoru uzбудnika.



Slika 5.15 Dupli voltmetar, hertzmetar, nul voltmetar, sinkronoskop te sinkronizacijske žarulje

Podjela opterećenja između generatora u paralelnom radu

Pretpostavimo da u elektrani imamo generatore G1 i G2 i neka G1 radi, a G2 da je izvan pogona, što znači da je G1 potpuno opterećen.

Raspodjelu opterećenja između generatora G1 i G2 vršimo tako da napon i frekvencija ostanu konstantni za vrijeme prebacivanja opterećenja sa G1 na generator G2.

Da se to postigne treba više puta naizmjenično djelovati na dovode radnog stroja i na uzбудnu struju.

Najprije se malo poveća dotok pokretača turbine generatora G2, a smanji turbine generatora G1. Zatim se djeluje na uzбудne struje u suprotnim smjerovima tako da se smanji uzбудna struja G1 i poveća generatora G2.

Sad ponovo djelujemo na dotok pokretača, a zatim na uzбудne struje.

Ove se radnje obavljaju sve dok se EMS generatora G1 i genertora G2 ne izjednače.

Tada će genertori podijeliti opterećenje.

Njihanje sinkronih generatora u paralelnom radu

Pri paralelnom radu generatora dolazi do pojave njihanja. To je njihanje osi polova rotora prema osima polova okretnog polja statora. Snaga sinkronog stroja ovisi o vrijednosti kuta među tim osima. Svaka promjena kuta izazva promjenu snage i struje u statoru. Ako su njihanja neznatna ona prouzrokuju povećane gubitke u statoru, ali ako su velika dolazi do ispadanja generatora iz sinkronizacije. Prema načinu nastanka njihanja dijelimo ih na :slobodna i prisilna.

Obje vrste njihanja mogu nastati istovremeno, ali su najopasniji u rezonanciji. Uzrok slobodnog njihanja je svaka promjena opterećenja generatora. Frekvencija slobodnog njihanja izračunava se po formuli:

Zaštita generatora

Dok je generator u paralelnom radu na mreži moramo paziti na mjere zaštite koje su drugačije nego u pojedinačnom radu. U pojedinačnom radu generatora nema opasnosti od prelaza generatora u motorski rad

Električna zaštita generatora treba dati nalog za odvajanje od prijenosne mreže za slučaj:

- neispravnosti i kvarova na proizvodnoj jedinici,
- otkaza ili neispravnog djelovanja mrežnih zaštitnih uređaja kod mrežnih kvarova, odnosno kvarova u elektroenergetskom sustavu i
- odstupanja napona i frekvencije sustava od utvrđenih granica i gubitka stabilnosti

Kod analize selektivnosti i koordinacije djelovanja zaštitnih uređaja proizvodne jedinice i mrežnih zaštitnih uređaja, treba uzeti u obzir najmanje sljedeće:

- vanjske simetrične i nesimetrične kratke spojeve,
- nesimetrično opterećenje,
- preopterećenje statora i rotora,
- nedopuštenu poduzbudu,
- previsoku i prenisku frekvenciju,
- magnetsko preopterećenje,
- asinkroni pogon,
- torzijska naprezanja,
- ispad pogonskog stroja (pogon u motorskom radu).
- diferencijalna zaštita generatora (štiti generator od unutarnjih kvarova)

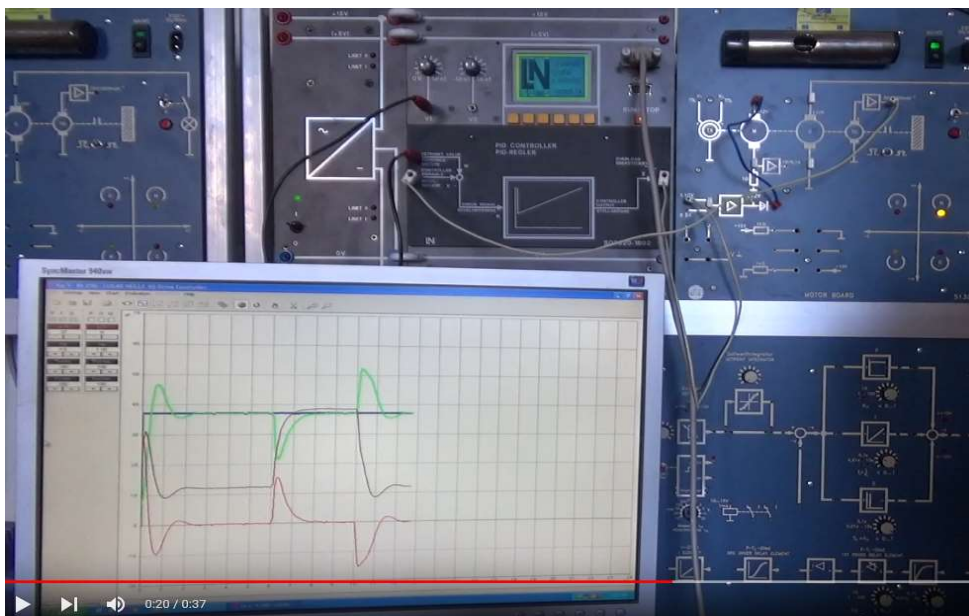
Danas se koriste numerički releji koji objedinjuju više releja za različite zaštite tj. zaštite od podnapona, prenapona, podfrekvencije, nadfrekvencije, asimetrije, kratkog spoja, preopterećenja, povratne snage,...



Slika 5.17 Upravljački istosmjerni krug prekidača

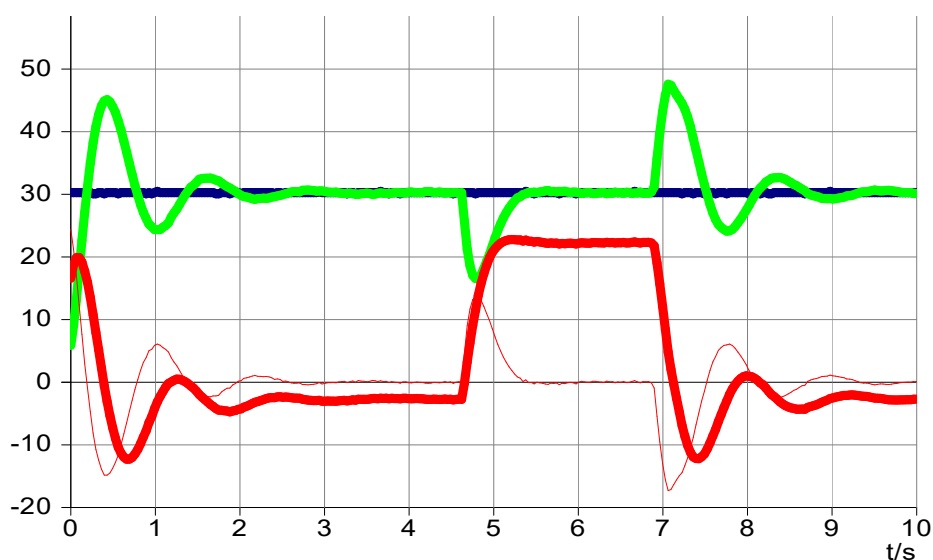


Slika 5.18 Numerički relej za manje generatore

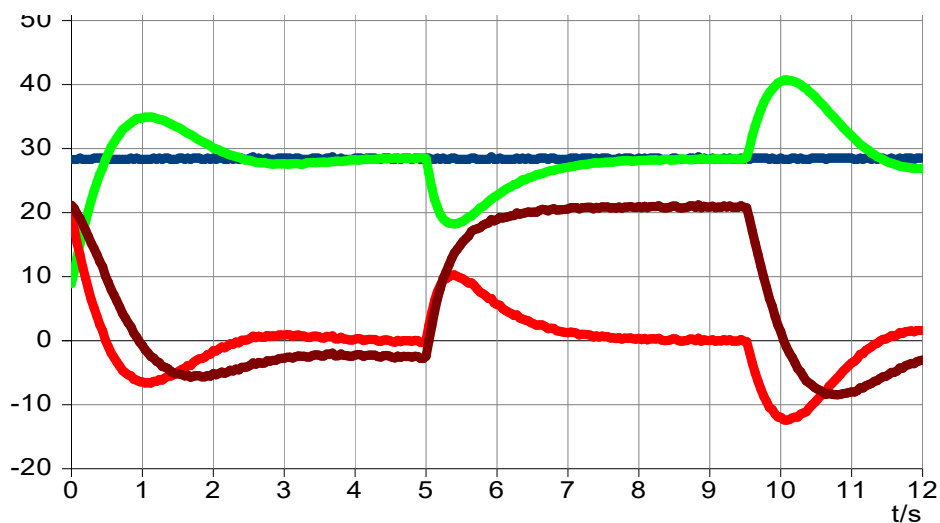


Slika 6.5 PID karakteristike regulatora napona i brzine vrtnje (preuzeto sa you tube kanala autora ove knjige)

Rasterećenjem generatora raste brzina i napon ali PID regulator brzo djeluje na smanjenje dotoka goriva i uzbudne struje tako da generator ponovo radi sa nazivnim podacima. Pravilnim podešavanjem P (proporcionalnog), I (integracijskog) i D (derivacijskog člana) uklanjaju se oscilacije i prevelika nadvišenja



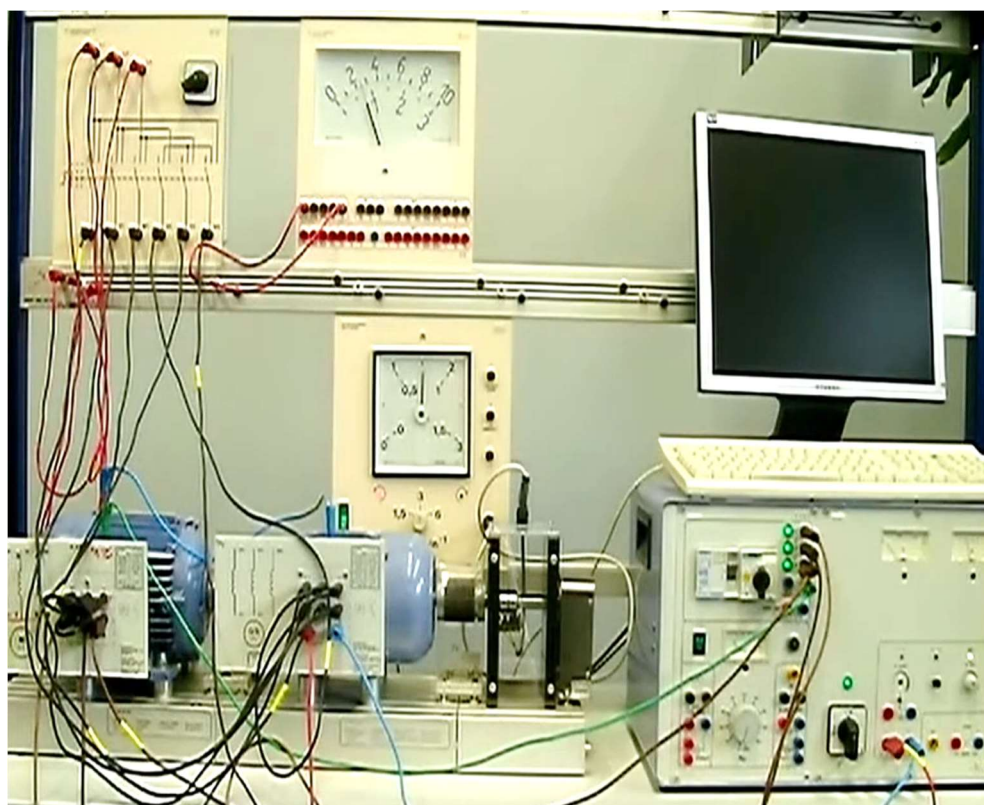
Slika 6.6 Dva nadvišenja napona (P malo prevelik)



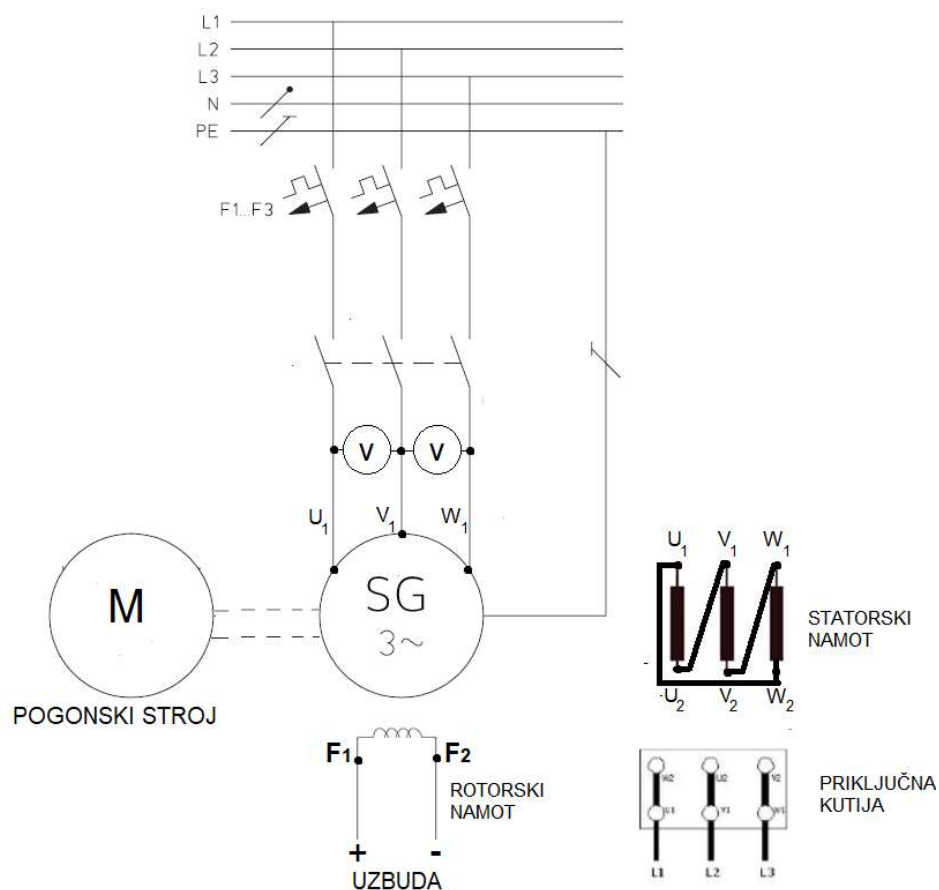
Slika 6.7 Jedno nadvišenje – P smanjen u odnosu na prošli slučaj

Trofazni sinkroni generator – spoj trokut

Ako kraj jednog namota spojimo sa početkom drugog pa kraj drugog sa početkom trećeg i na kraju kraj trećeg sa početkom prvog namota, dobit ćemo spoj u trokut.



Slika 6.28 Raspored opreme za ispitivanje generatora u spoju trokut – napon 230V
Na slici 127. u gornjem lijevom kutu je grebenasta sklopka pozicionirana na spoj trokut.



Slika 6.29 Trofazni sinkroni generator – spoj u trokut

Napon generatora u spoju zvijezda je $\sqrt{3}$ puta veći nego u spoju trokut: $U_y = \sqrt{3}U_\Delta$

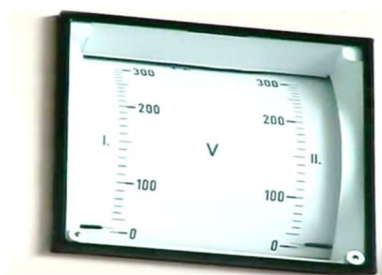
Sinkronizacija pomoću duplih instrumenata i nul voltmetra

Prije sinkronizacije provjerimo da li su ispunjena prethodno objašnjena 4 uvjeta sinkronizacije.

1. Jednakost napona generatora i mreže
2. Jednakost frekvencije generatora i mreže
3. Jednakost faznog pomaka generatora i mreže
4. Jednakost redoslijeda faza generatora i mreže

1. Jednakost napona generatora i mreže

Lagano podižemo uzbunu struju generatora i uspoređujemo napone mreže i generatora na duplom voltmetru. Kad se ta dva napona poklope postignut je željeni napon generatora. Ako naponi nisu jednaki mijenjamo uzbunu struju dok se ne izjednače.



Slika 6.35 Dupli voltmetar

2. Jednakost frekvencije generatora i mreže

Pomoću pogonskog stroja zavrtno rotor na sinkronu brzinu. Na duplom Hertzmetru uspoređujemo frekvenciju mreže i generatora. Kad se poklope frekvencije postignuta je željena brzina rotora generatora. Ako frekvencije nisu jednake moramo mijenjati brzinu rotora dok se ne izjednače.

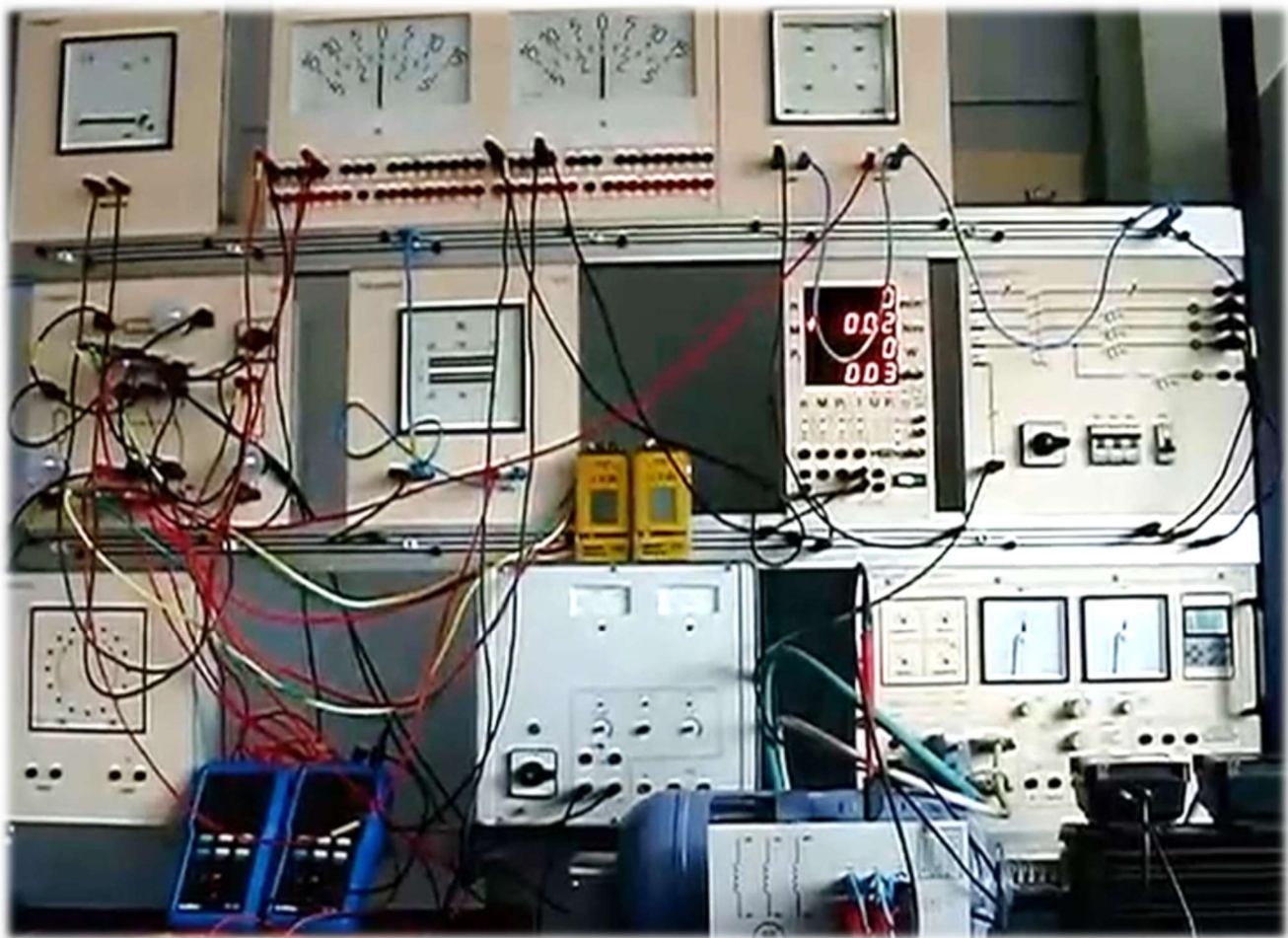


Slika 6.36 Dupli hertzmetar

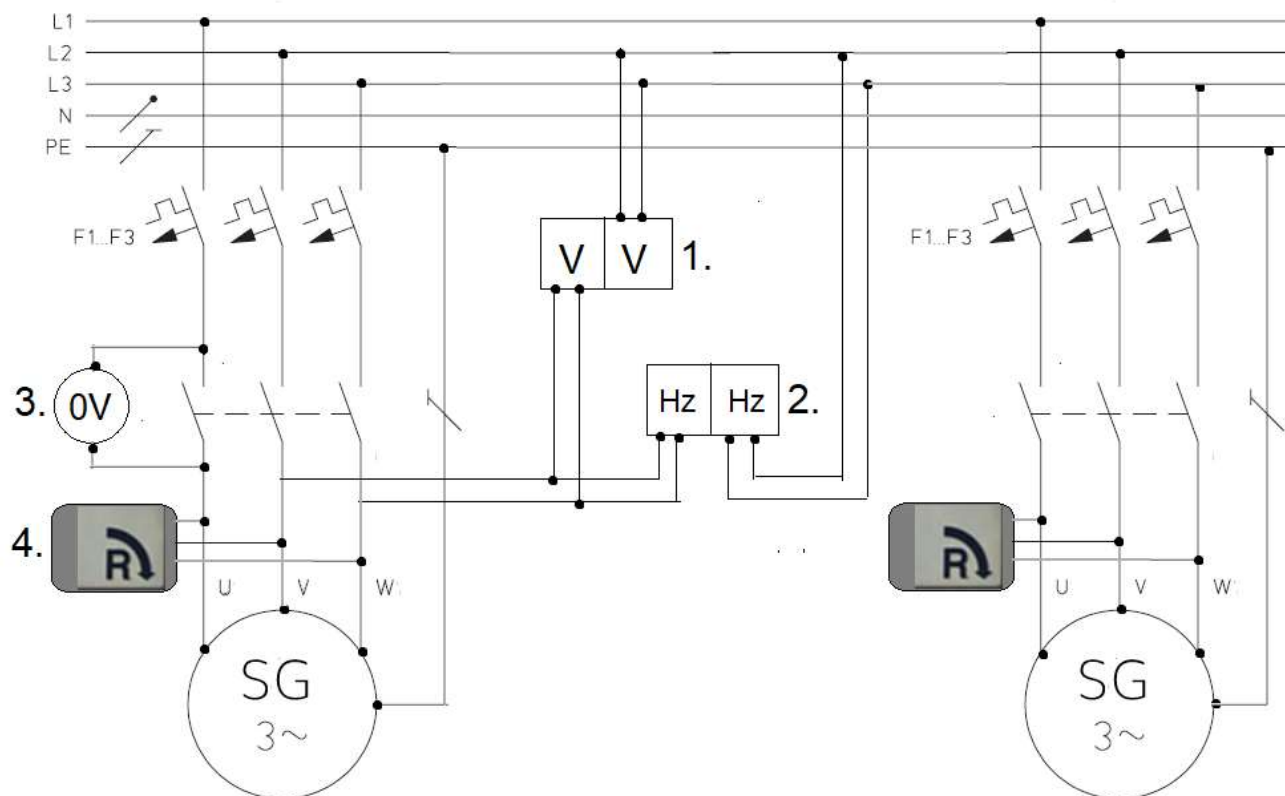
3. Jednakost faznog pomaka generatora i mreže



Slika 6.37 Nul Voltmetar



Slika 6.39 Raspored opreme za sinkronizaciju pomoću duplih instrumenata

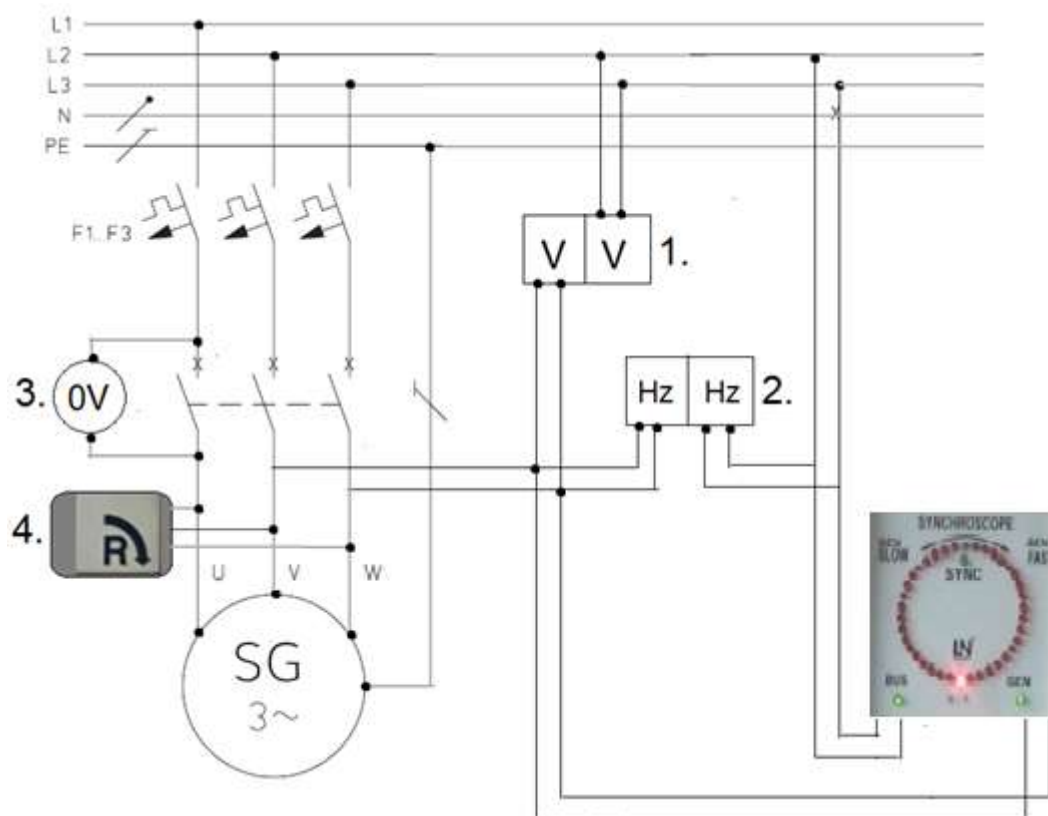


Slika 6.40 Shema spajanje 2 generatora u paralelni rad

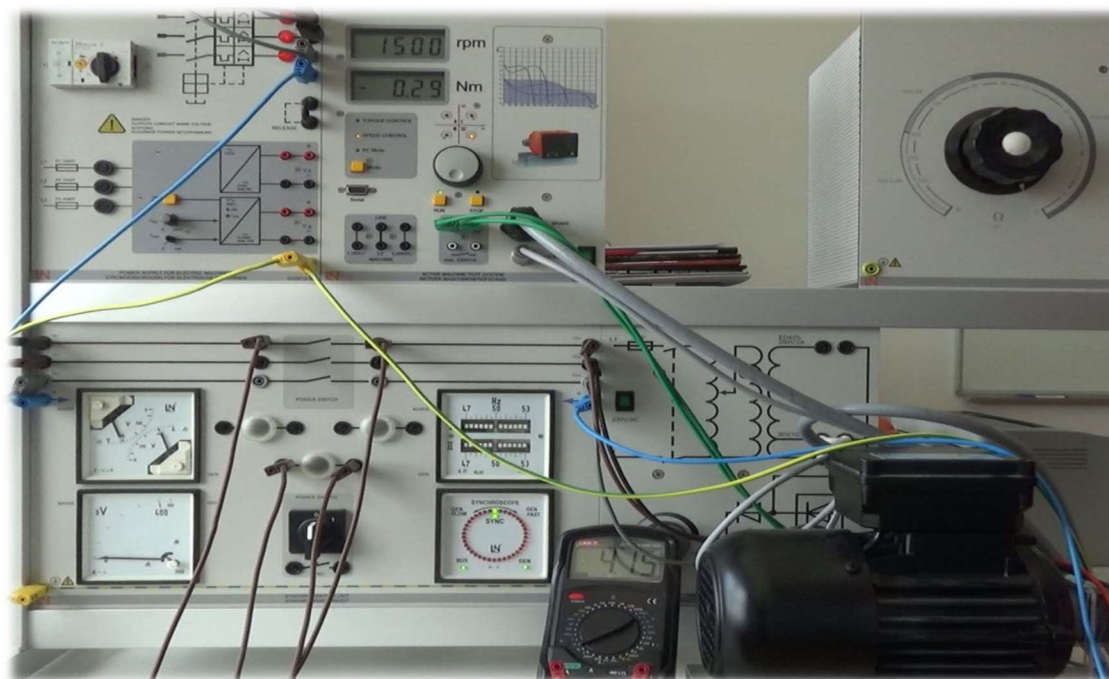
Sinkronizacija uz pomoć instrumenata i sinkronoskopa

Pored duplih instrumenata i nul-voltmetra možemo koristiti i sinkronoskop. Shema spajanja dana je na slici 139, a raspored opreme na slici 138.

Sinkronoskop ima u krug postavljene lampice. Zelena lampica je postavljena u 12 sati, a crvene su raspoređene u krug. Lampice se naizmjenično pale pa je dojam da svjetlo rotira. Kad se rotiranje uspori pričekamo da zasvijetli glavna žarulja zelene boje. Tada sklopkom uklapamo generator na mrežu. Također treba voditi računa o brzini rotacije crvenih lampica i vremenskoj odgodi od naredbe do trenutka uklopa kontakata sinkronizacijske sklopke. Zato se ponekad sinkronizacija vrši u 5 do 12, a ne točno u 12 sati. Ako nemamo sve te instrumente onda se možemo poslužiti i sinkronizacijskim žaruljama.



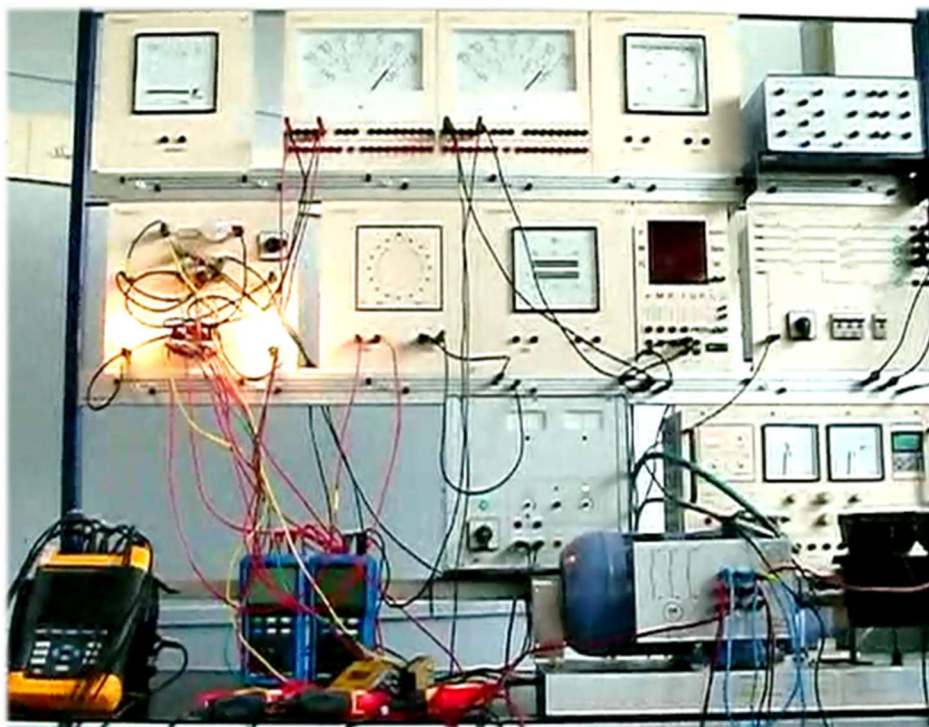
Slika 6.41 Sinkronizacija generatora na mrežu



Slika 6.42 Raspored opreme sa sinkronoskopom

Sinkronizacija generatora sa dva voltmetra, tri žarulje i sinkronoskopom

Umjesto nul voltmetra možemo pratiti sinkronizacijsku lampicu u tamnom spoju jer ona mora biti ugašena kad je sinkronoskop u 12 sati. Raspored opreme vidljiv je na slici 150.



Slika 6.51 Sinkronizacija generatora sa duplim instrumentima, tri žarulje i sinkronoskopom bez nul voltmetra

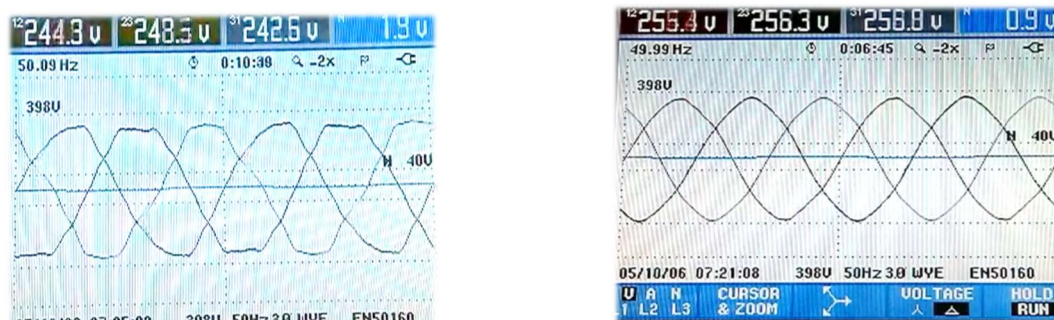
Prije i nakon sinkronizacije napon generatora nije jednak jer na njega djeluje sinkronizacijska sila gradske mreže i zbog malih dimenzija jako se njiše na mreži, odnosno prelazi iz generatorskog u motorski rad sa frekvencijom titranja od otprilike 0.5 Hz

Gornje lampice na slici 150 su spojene u svijetli spoj. Gornja lijeva lampica je spojena između druge faze mreže (crna boja desno od sinkronizacijske sklopke slika...) i treće faze generatora (siva boja lijevo od sinkronizacijske sklopke).

Gornja desna lampica je spojena između treće faze mreže (siva boja desno od sinkronizacijske sklopke slika...) i treće faze generatora (crna boja lijevo od sinkronizacijske sklopke).

Donja lampica je spojena u tamni spoj odnosno između prve faze mreže i prve faze generatora.

Sinkronizacija je moguća kad gornje lampice svijetle najjače, a da je istovremeno donja ugašena.

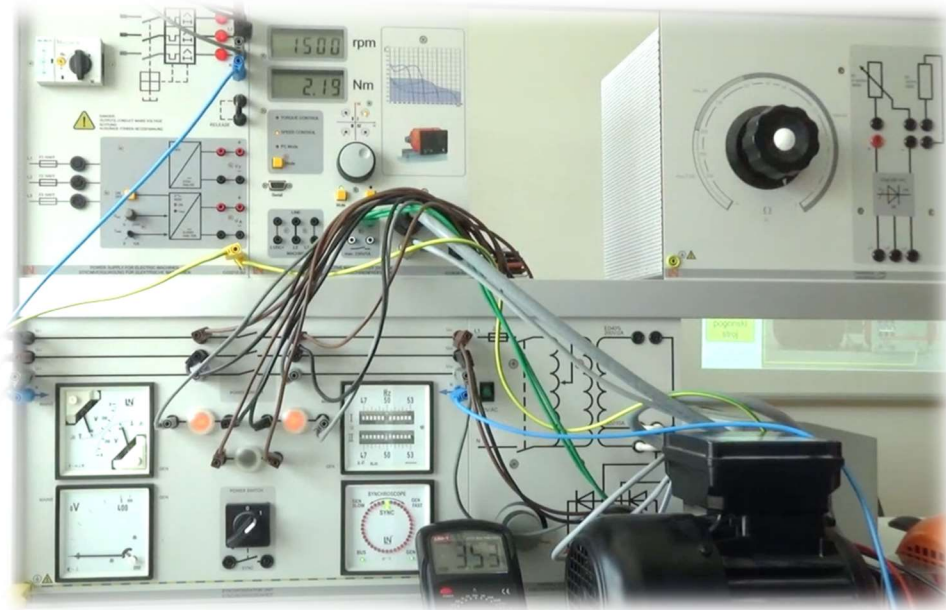


Slika 6.52 Spoj generatora u trokut na mrežu linijskog napona 250V (trafostanica je blizu škole) prije i nakon sinkronizacije

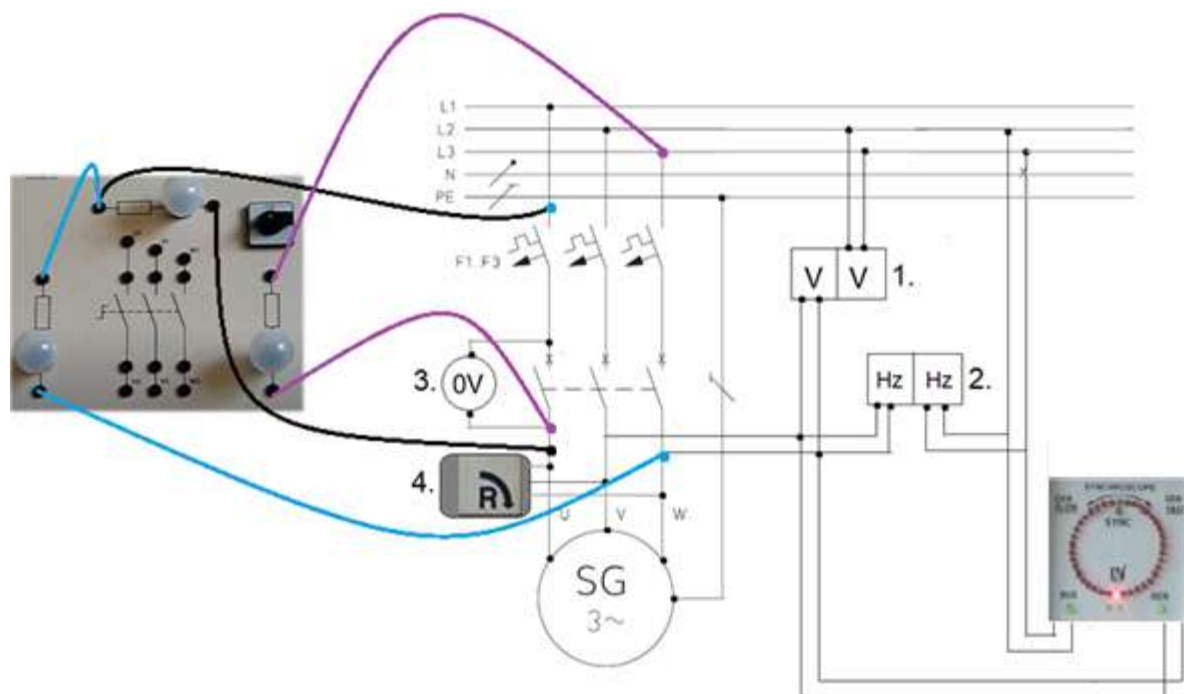
Sinkronizacija generatora sa duplim instrumentima, tri žarulje, sinkronoskopom i nul voltmetrom

Ovo je najbolja metoda jer daje uvid u najviše elemenata koji se prate prilikom sinkronizacije.

Vježba je ostvariva i sa opremom drugog proizvođača. Raspored opreme i položaji sinkronoskopa sa odgovarajućim položajem nul voltmetra i odgovarajućim stanjima sinkronizacijskih lampica vidljivi su na sljedećim slikama. Na slikama 154. prikazan je raspored opreme.



Slika 6.56 Sinkronizacija generatora sa duplim instrumentima, tri žarulje i sinkronoskopom sa nul voltmetrom

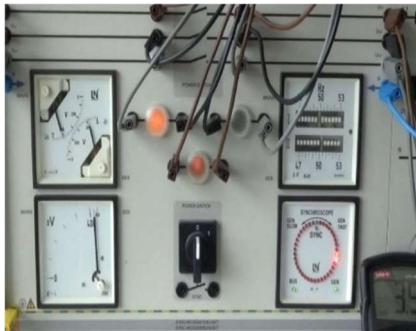


Slika 6.57 Montažna shema spajanja sa tri žarulje, duplim instrumentima i sinkronoskopom

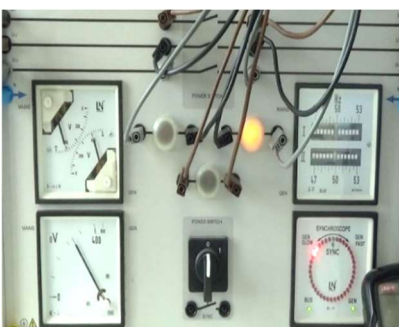
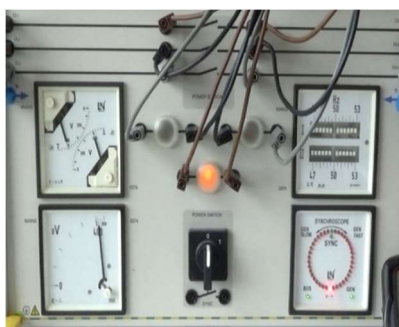
Žarulje u svijetlom spoju spojene su vodičima sive i crne izolacije (faze L2 i L3) dok je žarulja u tamnom spoju spojena vodičima smeđe izolacije (faza L1 mreže i faza L1 generatora). Dupli voltmetar mjeri srednje efektivne vrijednosti, a nul voltmetar razliku u faznom pomaku napona mreže i generatora. Iako su naponi na duplom

voltmetru jednaki, napon nul voltmetra se mijenja. Položaj upaljene lampice sinkronoskopa odgovara pokazivanju nul voltmetra

Na sljedećim slikama prikazani su svi elementi sinkronizacijskog panela u različitim položajima i stanjima.

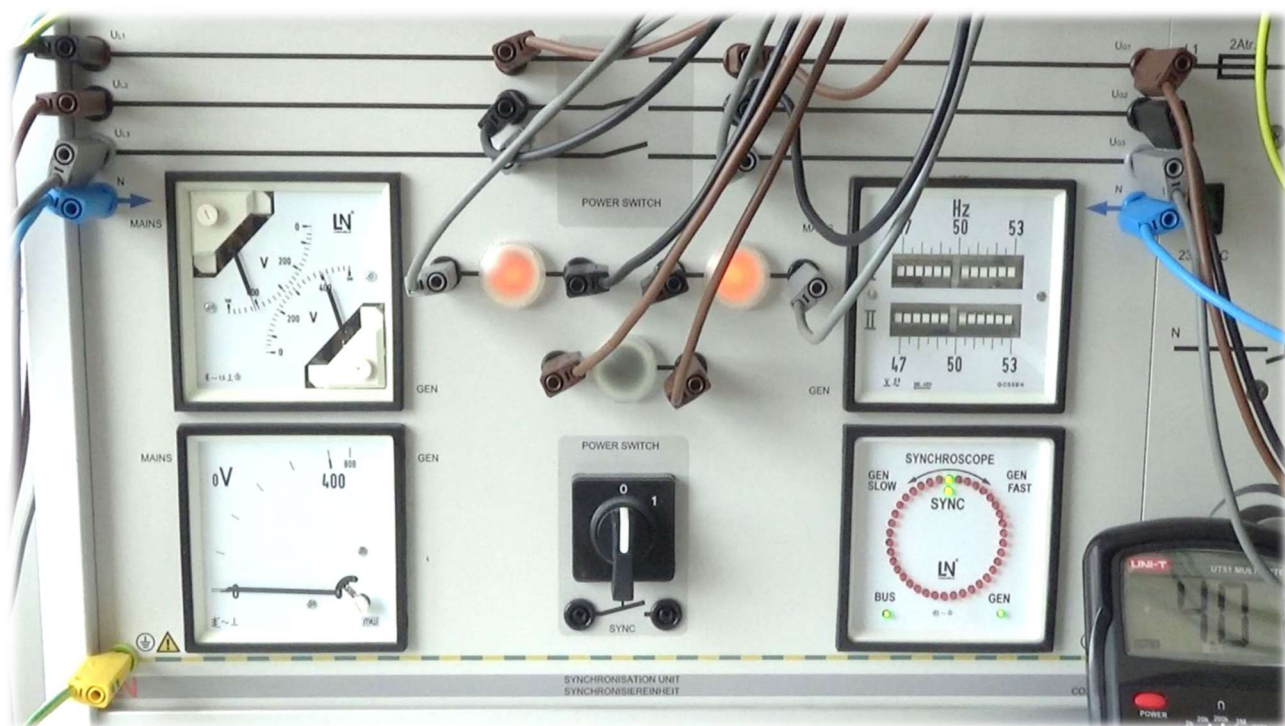


Slika 6.58 Sinkronizacijske lampe se kreću od 2 sata prema 6 sati – raste nul voltmetar prema maksimumu



Slika 6.59 Sinkronizacijske lampe se kreću od 6 sati prema 12 sati – pada nul voltmetar prema nuli

Kad je sinkronizacijska lampica točno u 12 sati napon nul voltmetra je nula, žarulja u tamnom spoju ne svijetli, a žarulje u svijetlom spoju svijetle najjače.



Slika 6.60 Sinkronizam 12 sati – zelena lampica, nul voltmetar pokazuje nula

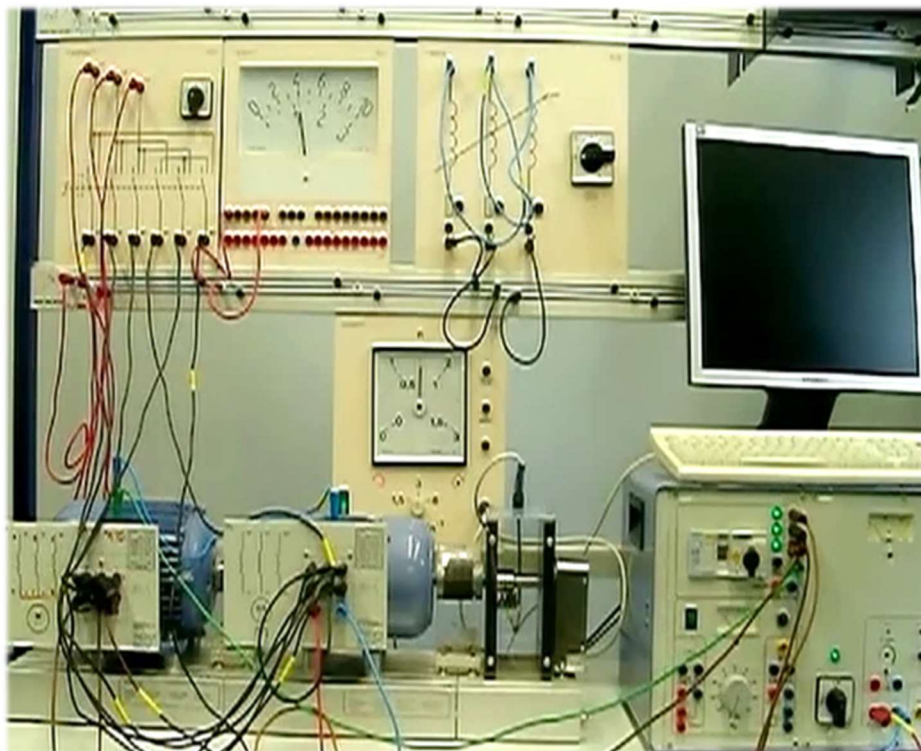
Opterećenje induktivno radnim teretom

Izvršimo sad mjerenja na RL otporniku prema slici 172 i shemi 173. Sad je faktor snage manji od 1.

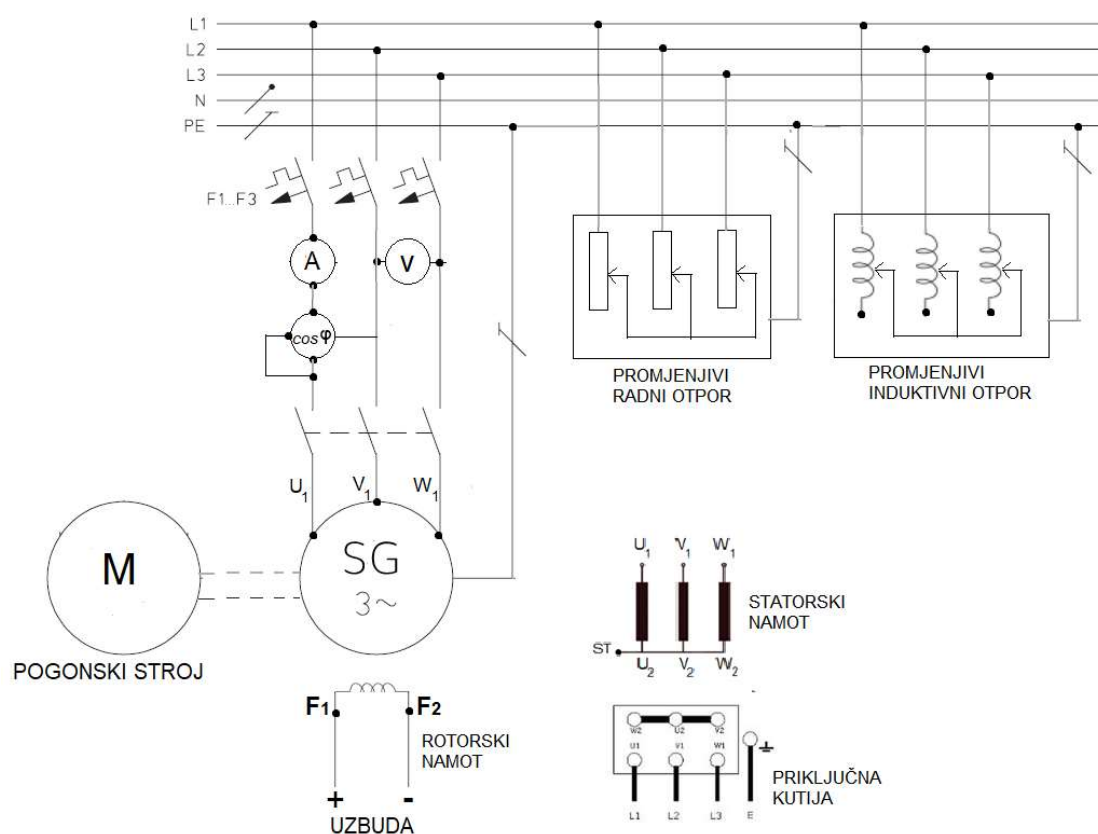
Mjerenja vršimo za tri vrste faktora snage: $\cos\varphi=0.8$ ind, $\cos\varphi=0.6$ ind te za $\cos\varphi \approx 0$ ind.

Za $\cos\varphi=0.8$ ind i za $\cos\varphi=0.6$ opterećujemo generator sa induktivnim teretom, a sa radnim teretom podešavamo faktor snage.

Za $\cos\varphi \approx 0$ ind. koristimo čisto induktivno trošilo. Ipak zbog utjecaja radnog otpora vodova faktor snage neće biti idealno jednak nuli.



Slika 6.76 Induktivni teret



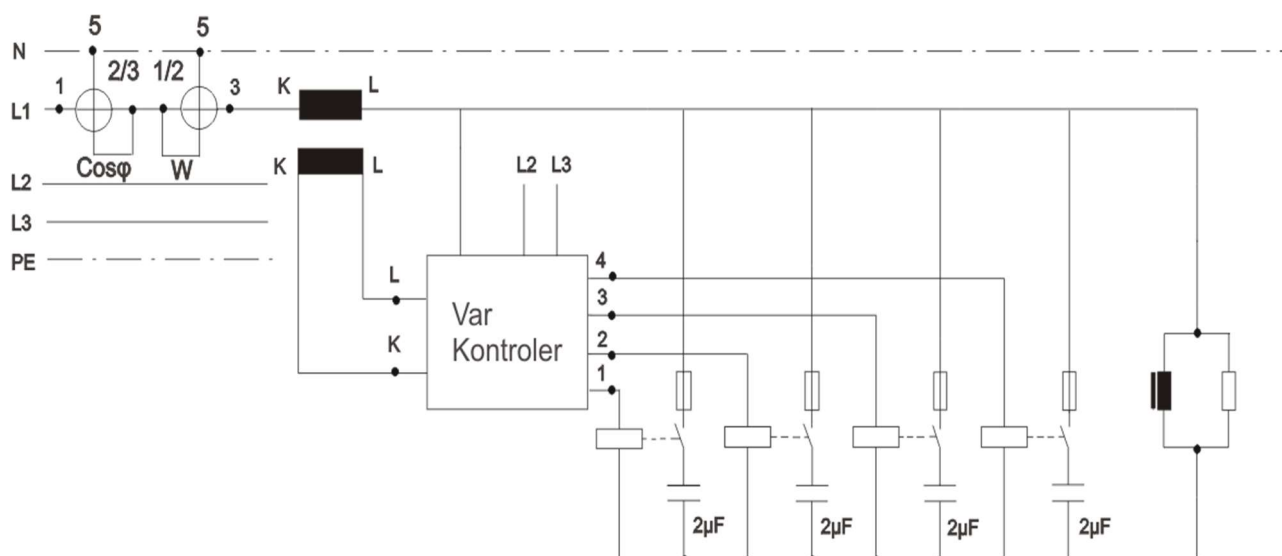
Slika 6.77 Shema spajanja

Automatsko kompenziranje reaktivne snage u EES

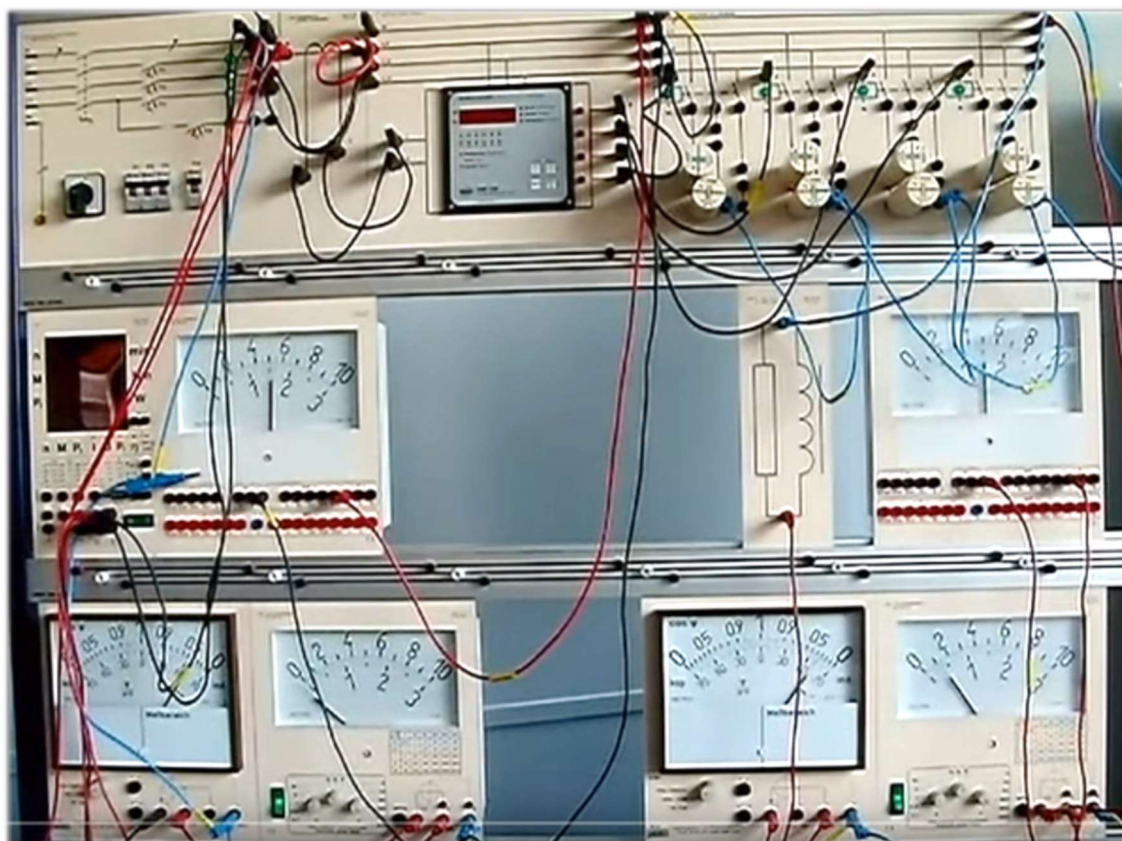
Na slici je prikazan jedan EES sa automatskom kompenzacijom reaktivne snage pomoću VAR kompenzatora

Ukupno četiri sklopnika mogu uključivati grupe kondenzatora u spoj zvijezda, trokut ili pojedinačno.

Na kraju je priključeno radno – induktivno trošilo.

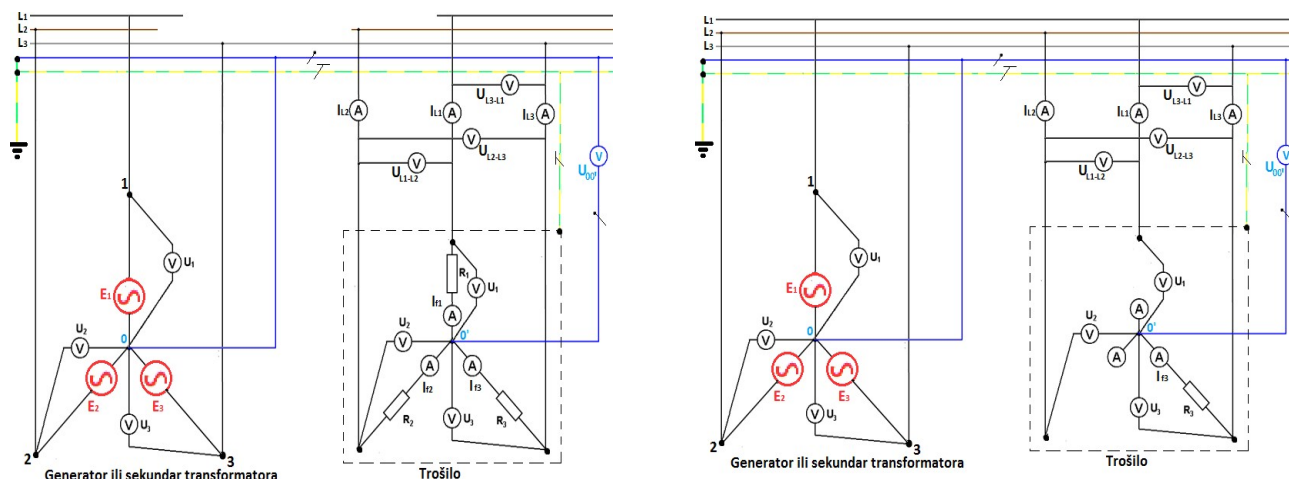


Slika 10.5 Primjena kompenzatora reaktivne snage



Slika 10.6 Raspored opreme za primjenu kompenzacije reaktivne snage

1b) Ispad dvaju vanjskih vodiča ili dvije faze kod spoja bez nul voda



Ispad 2 faze napajanja

Ispad 2 faze trošila

Slika 13.5 Ispad dvaju vanjskih vodiča ili dvije faze kod spoja bez nul voda

Trošilo ne dobiva snagu jer se ne zatvara strujni krug.

$P=0$

Primjer 5. Izračunaj snagu simetričnog trošila bez priključenog nul voda ako su isključena dva vanjska voda ili dvije faze trošila

$R_1=R_2=R_3= 1500 \Omega$.

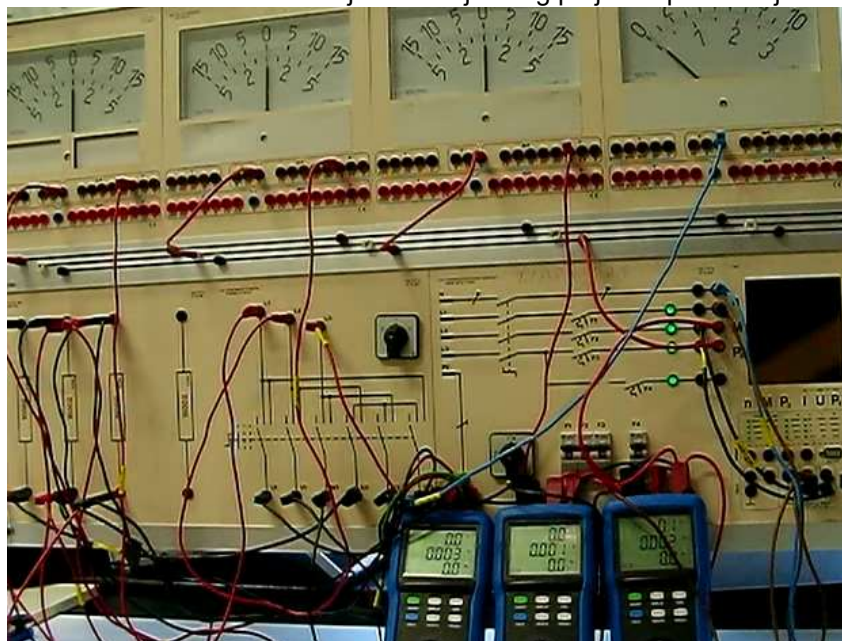
$P, W = ?$

$I_{1,2,3}= 0 \text{ A}, P = 0 \text{ W}, W = 0 \text{ kWh}$

	U ₁ (V)		I ₁ (A)	U _f (V)	I _f (A)	P _f = U _f • I _f (W)	P _{uk} = P ₁ +P ₂ +P ₃ (W)
L ₁ -L ₂	400	L ₁	0	0	0	0	0
L ₂ -L ₃	400	L ₂	0	0	0	0	
L ₃ -L ₁	400	L ₃	0	0	0	0	
U ₀₀ ' = 230 V							

Tablica 28. Snaga iznosi 0W

Sada se ne može zatvoriti ni jedan strujni krug pa je ukupna razvijena snaga i potrošena energija jednaka nula.



Slika 13.6 Ispad dva vanjska voda trošila u spoju zvijezda bez nul voda