

Jännitelähde Mk I. osa 1 - teoriaa

Tässä artikkelisarjassa käydään läpi CNC-koneen moottorikäyttöjen syöttöön tarkoitetun yksinkertaisen perusjännitelähteen toteutus. Tarkoitus on antaa riittävän yksityiskohtaiset ohjeet jotta niihin paneutumalla laitteen voi turvallisesti toteuttaa sähkötekniikkaan ja elektroniikkaan syvällisemmin perehtymätönkin harrastaja. Tuotos toki soveltuu moneen muuhunkin käyttötarkoitukseen kuin vain yllämainittuun.

VAROITUS

VAROITUS

VAROITUS

Tässä projektissa käsitellään **suoraan verkkojännitteeseen kytkettyjä komponentteja.**

Verkkojännite on potentiaalisesti

HENGENVAARALLINEN!

Työohjeet on laadittu turvallisuutta silmälläpitäen,
mutta mikäli perusohjeet luettuasi tunnet itsesi lainkaan epävarmaksi,

ÄLÄ LÄHDE TÄHÄN HANKKEESEEN!

VAROITUS

VAROITUS

VAROITUS

Edellytykset laitteen onnistuneelle toteuttamiselle:

1. Itsellä pitää olla ymmärrys siitä, ettei nyt olla hyppäämässä liian syviin vesiin
2. Laitteen rakentamiseen soveltuva työtila. Tilan ei tarvitse olla iso, mutta sen tulisi olla riittävän vapaa häiriöistä jotta keskittyminen ei herpaannu tärkeillä hetkillä
3. Perustyökalut, tärkeimpinä setti ruuvareita, mutteriavaimia, pihdit, sivuleikkurit, pora jne
4. **perusjuotin** varusteineen, juotoslankaa.
5. **yleismittari** ja sille **kunnolliset mittajohdot** (ehjät, soveltuvat verkkojännitteen mittaamiseen)
6. Juottamistaito. Juottamalla tehtyjen liitosten tulee olla kunnollisia, ja tekijällä pitää olla riittävä taito jotta kunnollisuus osataan varmistaa. Ellet osaa, harjoittele kunnes osaat. Ohjeita löytyy kyllä netistä.
7. Yleismittarin käyttötaito. Perussuureiden kuten jännitteen, virran ja resistanssin mittaaminen pitää onnistua turvallisesti ja niin että saadaan oikeita lukemia.
8. Malttia olla riittävän tarkka ja huolellinen toteutuksen avainkohdissa.

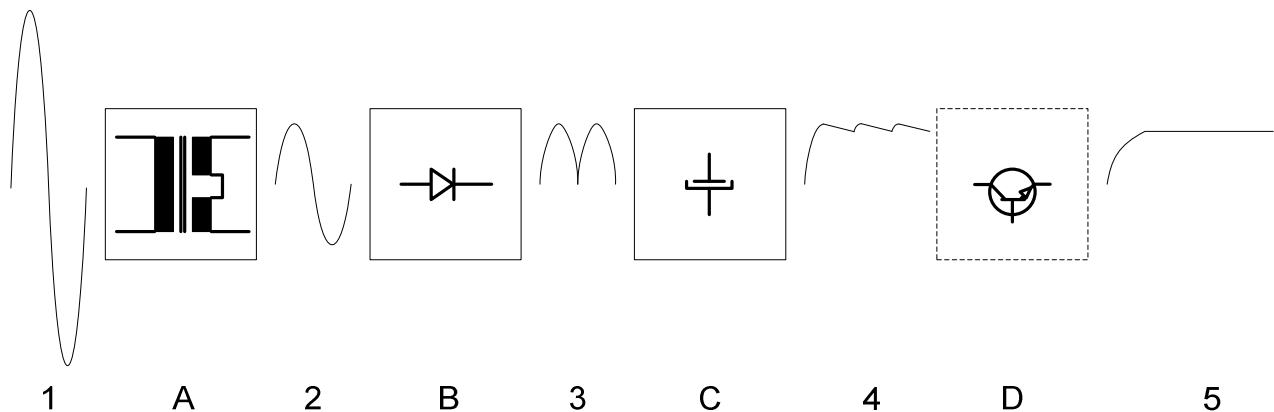
Sisältö:

1	Jännitelähteen toiminnan perusteet	3
1.1	Lohko A: Muuntaja	4
1.1.1	Muuntajan rakenne ja mitoitus	5
1.2	Lohko B: Tasasuuntaus	11
1.3	Lohko C: Suodatus	13
1.4	Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus	16
1.5	Lohko D: Regulointi.....	19
2	Kotelointi, Suojamaadoitus ja häiriönpoisto (alustavaa).....	19

1 Jännitelähteen toiminnan perusteet

Nyt toteutettava laite on yksinkertainen lineaarisesti reguloitu lähde. Jollei reguloinnille ole tarvetta, lähteen voi toteuttaa myös täysin reguloimattomana mikä yksinkertaistaa toteutusta jonkin verran.

Ennen varsinaiseen rakennustyöhön lähtemistä selvitetään lähteen toiminnallinen periaate jotta ymmärretään mitä ollaan tekemässä.



Kuva 1: Jännitelähteen toiminnallinen lohkokavio ja jännitteen aaltomuodot lohkojen välillä

Rakennetaan siis laite joka toteuttaa kuvan 1 mukaisen toiminnan. Tässä vaiheessa ei vielä lainkaan puututa konkreettisesti toteutuksessa esiintuleviin käytännön asioihin, vaan ainoastaan toiminnan periaatteisiin jotta ne ovat selvät kun lähdetään tekemään.

- Jännite 1 on laitteeseen sisään syötettävä 230V verkkojännite josta kähdetään muokkaamaan lopullista ulostulevaa jännitettä. Verkkojännite vaihtelee sinimuotoisesti arvojen +/- 325V välillä 50 kertaa sekunnissa, eli siis taajuudella 50Hz. 325 V on siis verkkojännitteen *huippuarvo*, mutta sen *tehollisarvo* on kaikille tuttu 230V.
- Toiminto A on muuntaja jolla verkkojännite alennetaan jännitelähteen mitoitusarvoon sopivaksi. Samalla muuntaja toteuttaa elintärkeän **galvaanisen erotuksen** valtakunnan verkosta. Muuntajan toisio siis kelluu maahan nähden jolloin yhden muuntajan toisioavan maadoittuminen (vaikkapa käyttäjän käden kautta) ei automaattisesti sulje virtapiiriä. Tämä on äärettömän tärkeä turvallisuusseikka.
Muuntajan ensiöpuolen kytkennät ovat automaattisesti hengenvaarallisia koska ne eivät ole galvaanisesti maasta erotettuja.
- Muuntajan toisiosta mitataan jännite 2 joka on samanlainen sinimuotoinen 50Hz vaihtojännite kuin verkkojännitekin. Muuntaja on alentanut jännitteen ensiö- ja toisiokäämien kierroslukujen suhteessa.
- Jännitteen 2 napaisuus vaihtuu 100 kertaa sekunnissa joten se ei sellaisenaan sovellu tasajännitettä edellyttävän elektroniikan käyttöön. Tasasuuntaaja B hoitaa tämän tarpeen ja muodostaa nimelliseen 0-jännitteeseen (laitteen "maa") referoidun sykkivän tasajännitteen.
- Sykkivä tasajännite 3 ei sellaisenaan ole hyvä koska se putoaa nolleen asti 100 kertaa sekunnissa. Jännitettä on siis edelleen jalostettava paremmin sopivaksi...
- ...Mikä tapahtuu suodatusastessa C. Suodatus koostuu riittävästä määrästä kondensaattoreita joiden varaus ylläpitää jännitelähteen lähtöjännitettä silloin kun tasasuuntaajalta tuleva jännite on alle kondensaattorin napajännitteen.
- Jännitekäyrän 4 nouseva osa seuraa tasasuuntaajan jännitekäyrää 3 ja laskeva osa määräytyy suotokondensaattorien kapasitanssin ja lähteen kuorman perusteella. Tasasuuntaajan

lähtöjännitteen 3 ollessa alle kondensaattorin napajännitteen kondensaattori syöttää kuormaa omalla varauksellaan. Varaus siis purkautuu kuormaan ja napajännite laskee kunnes tasasuuntaajan seuraava nouseva jännitepulssi jälleen varaa kondensaattorin muuntajan toision huippujännitteeseen.

Jännite 4 on jo käyttökelpoinen esim. moottorin syöttämiseen. Tulee vain huolehtia riittävästä suotokapasitanssista jotta lähtöjännitteen aaltoilu aiheuttaisi liian isoja vääntömomenttiheilahteluja moottorilla. Yleensä tämä ei ole ongelma asianmukaisesti mitoitetussa systeemissä.

- Mikäli tarvitaan tasaisempaa lähtöjännitettä kuin pelkkä suotaminen pystyy tuottamaan, on turvauduttava regulointiin eli vakauttamiseen. Tämä yksinkertainen jännitelähde toteuttaa vain lineaarisen reguloinnin jolloin jännitekäyrästä 4 leikataan vaihtelu pois ja jäljelle jää tasainen jännite 5. Tässä yhteydessä tulee pitää mielessä, että koko reguloinnin häviöteho muuttuu lämmöksi toiminnossa D. Lämmöksi muuttuva häviöteho on tuttuun tapaan virta kertaa jännite, tässä tapauksessa lähteen virta kertaa reguloinnissa pudotettava jännite, karkeasti (huippujännite - lähtöjännite)/2.

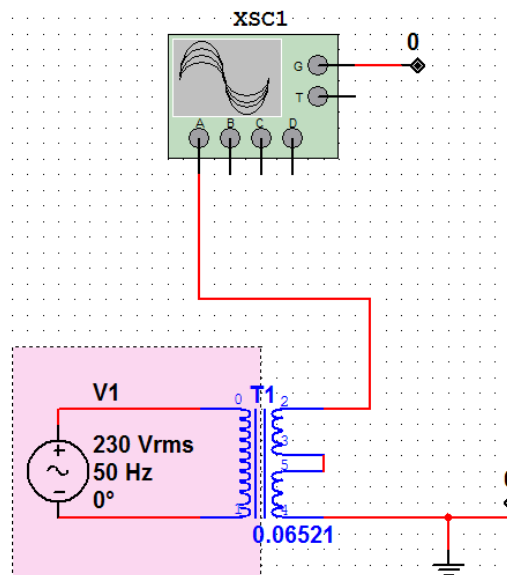
Kehittyneemmissä ratkaisuissa häviöt minimoidaan toteuttamalla jonkinlainen hakkuriregulointi. Kaikkien hakkurilähteiden yhteinen piirre on, ettei kytkinelementtiä (siis transistoria) ohjata lineaarisen toiminnan aluella vaan sitä käytetään nopeasti sulkeutuvana ja avautuvana kytkimenä. Näin tehohäviö transistorin yli minimoidaan. Hakkurin toteutustapoja eli topologioita on runsaasti erilaisia ja niihin palataan jos aihetta ilmenee.

Käydään seuraavassa toiminnot tarkemmin läpi teoriassa ja vähän käytännössäkin.

1.1 Lohko A: Muuntaja

Muuntajalohkon (siis Lohko A, Kuva 1) tarkoitus on alentaa verkkojännite moottorinohjaimille sopivaksi ja samalla erottaa tehopiiri galvaanisesti verkosta. Lohkoon kuuluu paitsi itse verkkomuuntaja myös kaikki käytännön toteutuksessa tarvittavat komponentit ja kytkennät.

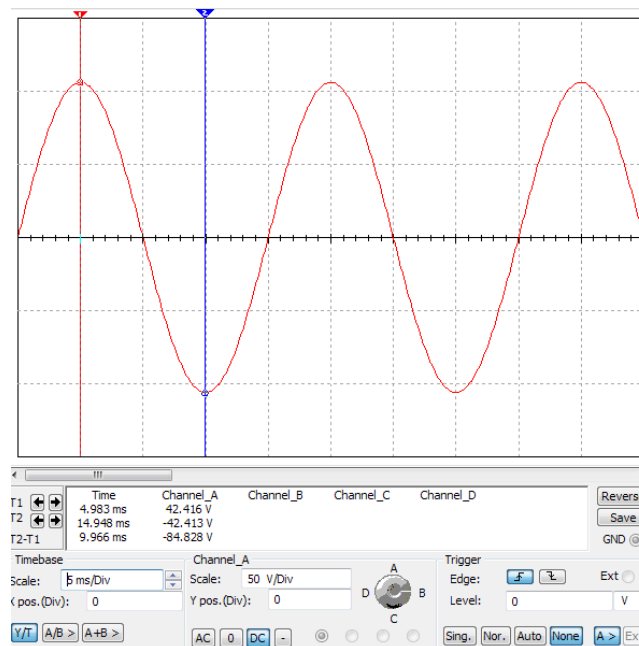
VARO!: Muuntajan ensiöpiiri ja kaikki siihen kytketyt komponentit (punainen tausta Kuva 2) ovat maasta erottamattomassa verkkojännitteessä. HENGENVAARA!



Kuva 2: Simuloitu piiri, lohko A - muuntaja

Kuva 2 on piirisimulaattoriin sijoitettuna esimerkin verkkomuuntaja. Sen toisiossa on 2 keskenään samanlaista käämiä jotka on tässä kytketty sarjaan. Kummankin toision muuntosuhde on 0,06521.

Muuntajien tyyppikilvissä ei yleensä ilmoiteta muuntosuhdetta vaan toisiojännite nimellisellä ensiojännitteellä ja toisiovirralla. Tässä tapauksessa kilvessä lukisi $2 \cdot 15 \text{ V}$ eli toisiojännite on 15 V per käämi. Sarjaankytkettyinä tietty 30 V yhteensä.



Kuva 3: Muuntajan toisiokäämin jännitekäyrä

Kuva 3 esittää simuloitua oskilloskooppikäyrää jollainen nähtäisi mitattaessa suoraan toisiojännitteen kääminpäistä. Muuntajan toisiojännite vaihtelee siis sinimuotoisesti huippuarvojen U_{p+} ja U_{p-} välillä. Kuitenkin yleismittari näyttää vaihtojännitealueella mitattaessa toista, alemmaa jännitettä joka on mittarin laadusta riipuen lähes tai tarkkaan U_{RMS} eli vaihtojännitteen tehollisarvo. Termi RMS johtuu sanoista Root Mean Square eli jännitteen neliöiden keskiarvon neliöjuuri. Menemättä tähän sen syvemmälle, RMS- eli tehollisjännite vastaa sitä tasajännitettä joka tuottaa vastuksessa saman keskimääräisen tehohäviön kuin kyseinen vaihtojännite. Yksivaiheisella jännitteellä tehollisarvon ja huippuarvon suhde on $\sqrt{2}$ eli likiarvona 1,4142. Jos muuntajan toisiojännitteeksi on siis ilmoitettu tai mitattu 15 VAC on jännitteen huippuarvo $\sqrt{2} \cdot 15 \text{ V} = 21,21 \text{ V}$ ja huipusta huippuun 42,42 V.

1.1.1 Muuntajan rakenne ja mitoitus

Jännitelähteen koko teho virtaa muuntajan läpi. Niinpä muuntajan mitoituksen on kaikilta osin oltava tarkoituksenmukainen ja vastattava jännitelähdettä käyttävien moottorinohjainten vaatimuksiin. Käydään läpi joitakin esimerkkejä.

1.1.1.1 Käytännön esimerkki 1: tunnettu valmiskomponentti



Kuva 4: Tyypillinen toroidimuuntaja (1 toisiokäämi)

Kuva 4 esittää tyypillistä yleisesti käytettyä toroidi- eli rengassydänmuuntajaa. Vasemmalla koottuna asennusvalmiiksi ja oikealla asennusosat purettuna auki. Toroidimuuntajien asennuksessa on pidettävä mielessä hyvä asennustapa: muuntajan teippieristeisiä käämejä ei koskaan asenneta vasten kotelointia tai mitään johtavaa materiaalia ilman välissä olevaa eristettä. Usein tämä eriste on kumilevy tai kuten tässä, eristekartonki. Oikeanpuoleisessa kuvassa nähdään siis seuraavat asennusosat vaemmalta alkaen: ontto sidepultti jolla muuntajapaketti kasataan; paketin alusteräslevy ja sen eristekartonkikiekko; varsinainen muuntaja; paketin päällysteräslevy eristekartonkeineen; kiinnitysprikka ja mutterit. Asennustarvikkeet vaihtelevat valmistajan mukaan mutta yhteistä niille on, että itse muuntaja on suojattu mekaanisilta vaurioilta ja eristetty asennusalustastaan. Eristyksen tulee toteutua asianmukaisesti kaikissa asennustavoissa!



Kuva 5: Muuntajan tekniset tiedot

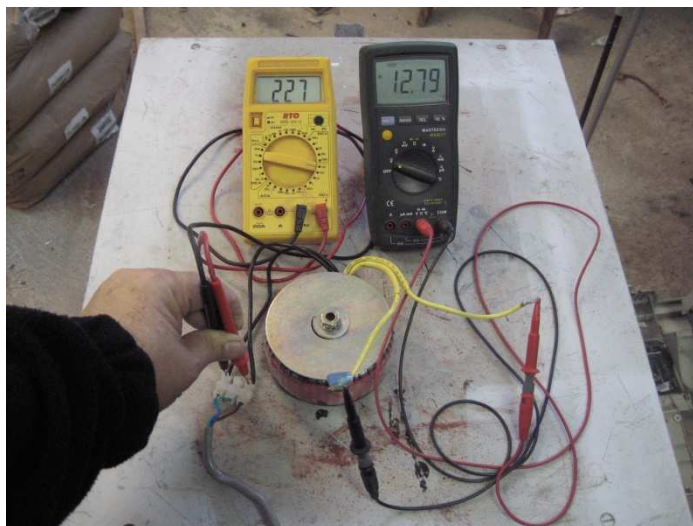
Kuva 5 näyttää esimerkin muuntajan tekniset tiedot. Tyypilapusta voidaan nähdä seuraavaa:

- PRI 240V - 50Hz BLK-BLK
Muuntajan ensiö (primary - PRI) on mitoitettu 240V 50Hz vaihtojännitteelle ja tuotu ulos mustilla (BLK) johtimilla,
- SEC 12V - 150VA 12.5A YEL-YEL
Muuntajan toision (secondary - SEC) nimellisjännite on 12V (huom: siis tehollisjännite - huippujännite on 1,41 x tehollinen). Toision kuormitettavuus on 150VA eli puhtaalle

vastuskuormalle 150W. Toision maksimivirta on 12,5 A (taas tehollisarvo). $12\text{ V} * 12,5\text{ A} = 150\text{ VA}$ joten luvut täsmäävät. Toisio on tuotu ulos keltaisilla johtimilla (YEL).



- Tyyppilapun oikeassa yläkulmassa nähdään vielä suojajännitemuuntajan symboli. Suojajännitemuuntaja on rakenteellisesti suojattu oikosulkua ja ylikuormitusta vastaan. Tähän viittaa myös viereinen lämpökatkaisimen symboli sekä ilmoitettu katkaisulämpötila 130 C. Tätä muuntajaa ei siis periaatteessa pysty polttamaan ylikuormittamalla.

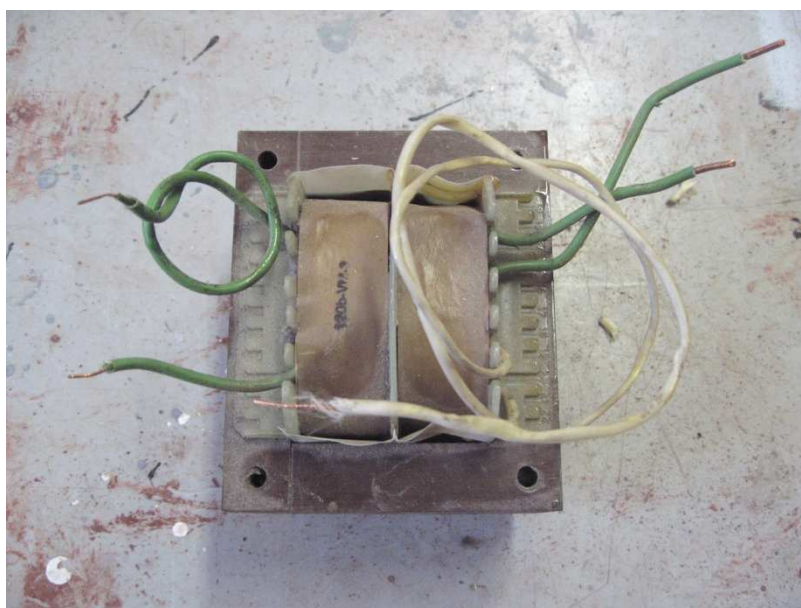


Kuva 6: Muuntajan muuntosuhteen varmistaminen mittaamalla

Kuva 6 osoittaa muuntajille tyypillisen piirteen: tyhjäkäyntijännite ylittää nimellisjännitteen 5-10%. Nimellisjännite ilmoitetaan nimelliskuormalla ja muuntajan häviöistä aiheutuu muutaman prosentin ero tyhjäkäynti- ja nimellisjännitteen välille. Rengassydänmuuntajilla ero on kaikkein pienin.

1.1.1.2 Käytännön esimerkki 2: sotasaaliina saatu purkuosa

Harrastelijoille kertyy nurkkiin kaikenlaista. Seuraava esimerkki on tuntemattomaan tarkoitukseen aikanaan tehty muuntaja josta ei ole tarkkoja teknisiä tietoja käytettävissä.



Kuva 7: mahdollisesti käyttökelpoinen muuntaja

Ensin pitää selvittää onko kyseessä todella verkkomuuntaja.

- Jos muuntajan rakennetapa olennaisesti poikkeaa tavanomaisesta niin käsissäsi voi olla vaikkapa neonmuuntaja tms josta lähteekin kilovoltteja eikä voltteja. Kokeilun kannalta huono enne. Perinteinen verkkomuuntaj näyttää juuri siltä kuin Kuva 7, eli sydän on ns. E-I levypakka joka ympäröi erillistä kelarunkoa. Rengassydän eli edellisen esimerkin toroidi on sitten se toinen yleinen vaihtoehto, kaikki olennaisesti näistä poikkeavat rakenteet ovat lähtökohtaisesti epäilyttäviä.
- Muuntajan kelarunko on jaettu 2 osaan mikä on selvä osoitus siitä, että toisella puolella voisi olla ensiö ja toisella toisiö(t). Kuvassa ensiö olisi vasemmalla. Oikeanpuoleisista tosiokäämeistä vihreällä eristetty (sama väri kuin ensiössä) on huomattavan paksua käämilankaa joten se lienee varsinainen kuormakäämi. Valkealla lämpöeristesukalla suojattu toisiokäämi on ilmeisesti johonkin apujuttuun ajateltu.

Muuntosuhteen selvittäminen

Menetelmä 1: Mikäli käytävissä sattuu olemaan induktanssimittari, muuntosuhde voidaan mitata kelainduktanssien neliöjuurien suhteena (kts Kuva 8).



Kuva 8: Ensiön ja toisioin kelainduktanssit

Oletetun ensiön induktanssi on mittauksen mukaan 589 mH ja oletetun toisioin 10,14 mH. Lukuarvot vaikuttavat uskottavilta 230 V verkkomuuntajalle.

Muuntajan muuntosuhde ensiön ja vihreän toisioin välillä on tällöin $n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{10,14 \text{ mH}}{589 \text{ mH}}} = 0,131$ jolloin ensiöjännitteellä 230 V vihreän toisioin jännite olisi $0,131 \cdot 230 \text{ V} = 30,1 \text{ V}$. Samaan tapaan laskettuna valkean toisioin jännite olisi 27,4 V

Menetelmä 2:

Jos ensiökäämin tunnistaminen tarkastelemalla ei yksinkertaisesti onnistu eikä mittalaitteita ole käytettävissä, niin on toinen konsti: Ota tunnettu verkkomuuntaja jossa on pienehkö toisiojännite, esim 6-9 VAC. Kytke tämän toisio testattavan muuntajan oletettuun ensiökäämiin ja volttimittari oletettuun toisioon. Kun nyt mittaat syntyvät jännitteet testattavan muuntajan ensiöstä ja toisiosta, saat muuntossuhteen josta on helppo laskea toisiojännite 230 V ensiöjännitteellä.

Esim. näin: 9,0 VAC ensiöjännite tuottaa 1,145 VAC toisiojännitteen. Muuntosuhde on siis

$$n = \frac{U_{\text{sec}}}{U_{\text{pri}}} = \frac{1,145 \text{ V}}{9,0 \text{ V}} = 0,127$$

ja toisiojännite 230 VAC verkkojännitteellä $U_{\text{sec}} = n \cdot U_{\text{pri}} = 0,127 \cdot 230 \text{ V} = 29,2 \text{ V}$.

Tämä on turvallinen tapa välttää suuria jännitteitä mikäli muuntaja kuitenkin olisi kytketty väärinpäin

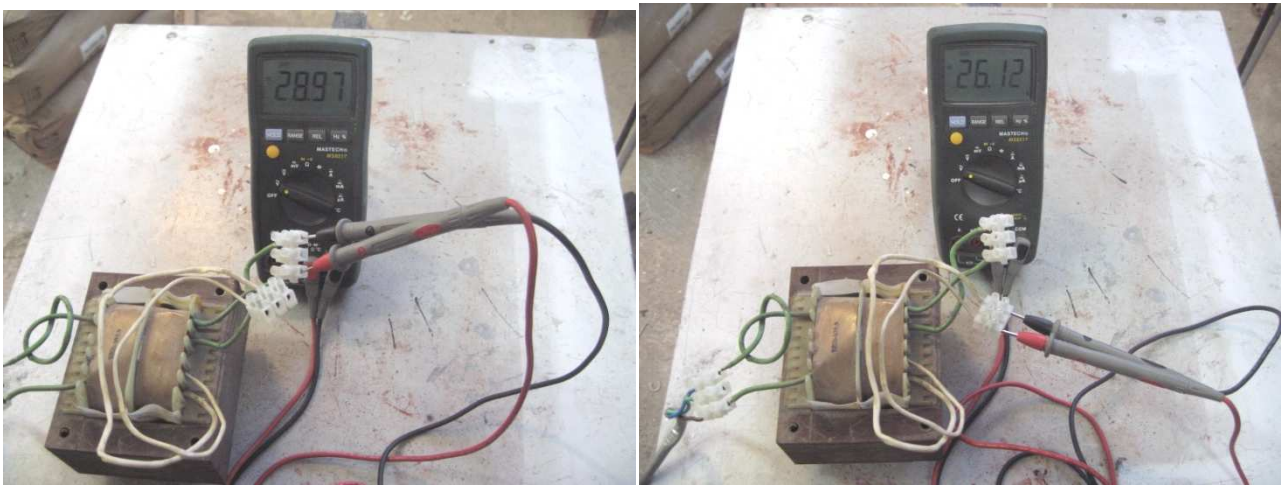
testissä. Väärinpäin kytkeminen tuottaisi tässä tapauksessa mittariin jännitteen 138 VAC kun taas kokeiltaessa verkkojännitteellä olisikin saatu 3,5 kV! Ei hyvä.

Muista myös, että vaikka mitaat vain yhtä käämiä kerrallaan, myös kaikkiin muihin toisiokäämeihin tulee jännite. Varo siis niiden menemistä oikosulkuun mittauksen aikana. Suositeltavaa on tehdä kuten Kuva 9 eli sitoa kaikki kääminpäät liittimin, esim sokeripalaa käyttäen. Myös mittajohdot pysyvät hyvin kiinni sokeripalan ruuveissa ilman käsinpitämistä.

Menetelmä 3:

Jos ensiökäämin tunnistaminen onnistuu luotettavasti, ei ole estettä selvittää muuntajan toisiojännitettä suoraan mittaamalla.

Käytännön mittaukset 227V vallitsevalla verkkojännitteellä (Kuva 9) osuvat varsin lähelle induktanssiperiaattella ja matalaa jännitettä käyttäen laskettuja arvoja tuloksilla 28,97 V ja 26,12 V.



Kuva 9: Toisiojännitteet 228 V ensiöjännitteellä

Toisiojännitteen puolesta tällainen muuntaja olisi siis melko sopiva moottorikäyttöjen jännitelähteeksi.

Nyrkkisääntöjä ja turvallisuusjuttuja tähän tapaukseen liittyen:

- Lahjahevosen suuhun kannattaa tässä tapauksessa katsoa aika tarkkaan. Varmista että:
 - Muuntajassa ei näy merkkejä ylikuumenemisesta. Tämä näkyy lähinnä kelojen pintaeristeen värimuutoksina eli jokin osa muuntajasta on paahtoleipää.
 - Käämitys ja käämirunko vaikuttaa ehjältä. Erityisesti on varottava käämin oikosulku muuntajan runkoon. Joskus vanhojen muuntajien käämirungot ovat kyllästettyä kartonkia tai muuta haurasta materiaalia joka on saattanut kolhiintua. Riskejä ei kannata ottaa. Jos taas mitään vikaa ei huolellisessa tarkastuksessa näy voi olettaa käämin olevan kunnossa. Harvoinpa se sisältä vaurioituu mekaanisesti jättämättä ulospäin mitään merkkejä.
 - Ennenkuin edes mietit verkkojännitteen kytkemistä muuntajaan niin tunnista ensiökäämi. Muuntajan kytkeminen verkkoon väärinpäin on huono ajatus. Tämän esimerkin muuntajalle tunnistus oli helppo; kelarungossa on eri välit ensiölle ja toisiolle. Verkkomuuntajassa on yleensä vain yksi ensiökäämi¹ joka on tyypillisesti joko sinin käämi tai omassa välissään kuten tässä. Alennusmuuntajan toisio on aina käämitty paksummalla

¹ Ensiöitä voi olla useampia mikäli muuntaja on mahdollista asetella useammalle ensiöjännitteelle.

käämilangalla joten myös se on varma toisio tunnusmerkki. Paksuutta ei voi eikä pidä mitata mahdollisista erillisistä liitosjohdoista vaan suoraan käämilangasta.

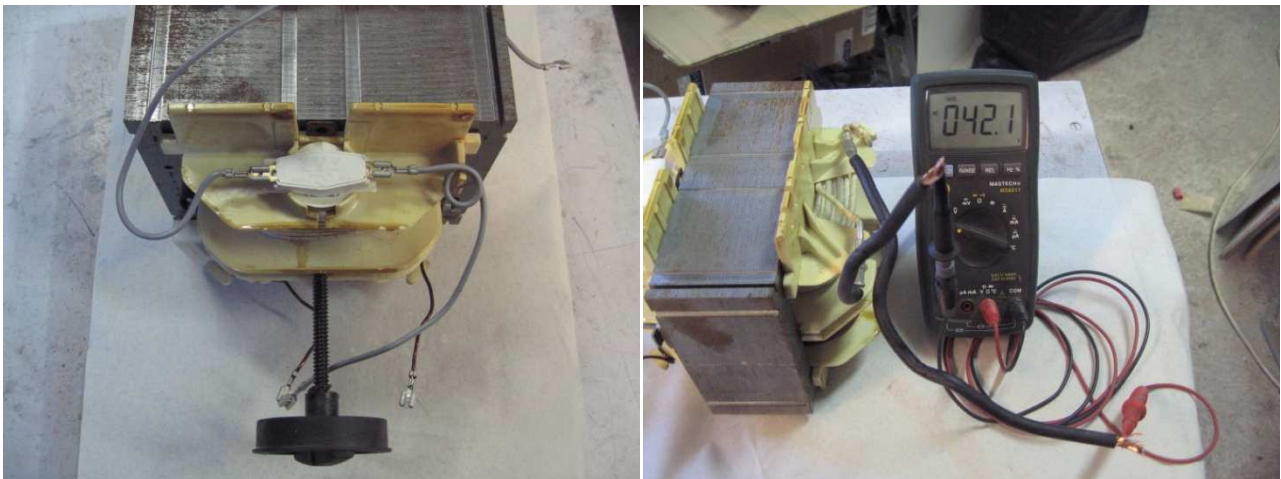
- Jos teet mittauksia kuten yllä niin muista, että muuntajan ensiö on verkkojännitteinen. NÄPIT IRTI! Parasta on tehdä mittaus kuten yllä Kuva 9, eli koskettamatta lainkaan mitattavaa systeemiä. Jos muuntaja on kaikesta huolimatta kytketty väärinpäin voi mittarille tulla kilovolttien luokkaa olevia jännitteitä! Mittari mitä ilmeisimmin tuhoutuu, mutta **samalla voi mennä henki jos sitä pidetään kädessä!** Siis: NÄPIT IRTI!
- Käytä kunnollista verkkojohtoa ja luotettavaa ensiöliitosta. Ei mitään johtojen kiertämistä toisen ympäri tms. Sokeripala kiinni testin ajaksi ja sitten heti irti, ettei muuntaja ole vahingossakaan jännitteinen kun silmä välttää. Jätä sokeripala kiinni verkkojohtoon niin sen johdonpäätt eivät ole välittömästi hengenvaarallisia jos töpseli menee epähuomiossa seinään. Mutta sanomattakin täytyy olla selvää, ettei töpseli ole seinässä kuin testihetken ajan ja sitten heti irti. Mitään säätöjä ei tehdä testijärjestelyn ollessa jännitteinen.

Muuntajan tehonsiirtokykyä joudutaan arvioimaan sen mittojen perusteella. Tämä muuntaja painaa 4,8 kg ja sydämen mitat ovat 120 x 100 x 65 mm. Vertailu vaikkapa Muuntosähkön (nyk. Trafox) L-sarjaan (kts linkki <http://www.trafox.fi/index.php?id=288>) antaisi ymmärtää muuntajan tehon olevan noin 300 VA olettaen sen lämpöluokaksi varovasti 130 C. Näin ollen maksimi toisiovirta olisi $I_{sec} = \frac{P_{tot}}{U_{sec}} = \frac{300}{30} = 10A$. Riittävä moneen koneeseen parin-kolmen akselin pyörytykseen.

Näillä testeillä on selvitetty, että saalismuuntaja on n. 300VA tehoinen ja siinä on kaksi toisiota joista toinen vihreissä johdoissa on 30V 10A ja toinen valkeissa johdoissa n. 28 V, maksimivirta tuntematon, mutta johtimen paksuuden perusteella noin 1A. Vihreä toisio on käyttökelpoinen moottoripowerin tarpeisiin.

1.1.1.3 Käytännön esimerkki 3: vanha hitsausmuuntaja

Hitsauksessa tarvitaan suurta virtaa ja sitä lähtee tästä muuntajasta (Kuva 10). Tällainen löytyy halvasta vaihtovirtahitsauskoneesta jollaisia on uutenakin myynnissä muutamalla kympillä.



Kuva 10: Yksinkertainen hitsausmuuntaja

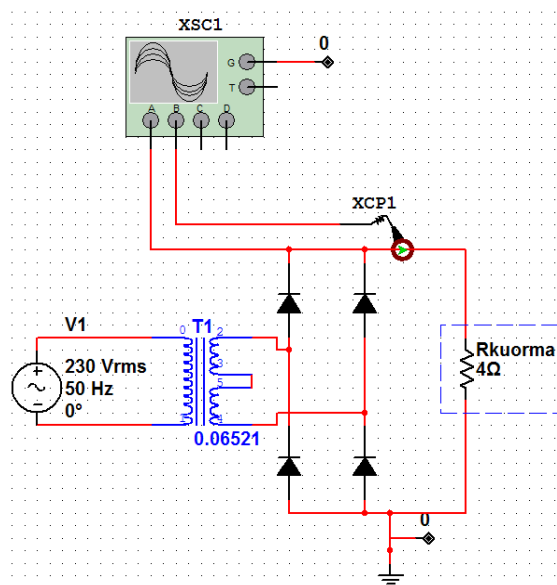
Muuntajan rautasydämellä on mittaa 175 x 130 x 65 mm ja koko laitteella painoa liki parikymmentä kiloa. Pintapuolinen tarkastelu näyttää heti pari juttua: ensinnäkin muuntajassa on lämpösuoja joka katkaisee ensiön syötön ylikuumenemistilanteessa. Tämähän on hyvin tyypillistä hitsattaessa. Lämpösuoja on hyödyllinen varuste myös jännitelähteelle yleisesti joten se otetaan käyttöön. Toinen huomiota kiinnittävä seikka on muuntajan kyljestä esiin tuleva ruuvi. Moista ei näe tavallisessa muuntajassa, mutta hitsausmuuntajassa kyllä; sillä säädetään sydämen magneettivuon vastusta eli reluktanssia ja samalla

toisiosta saatavaa maksimivirtaa (tehoa). Hitsauksessa palava valokaari kun on lähes oikosulku on piirin virtaa rajoitettava ulkoapäin ja ilman mitään elektroniikkaa se tapahtuu tällä ruuvilla. Jännitelähdekäytössä kierrämme ruuviin "kaakkoon" eli sydämen säätöpala aivan sisään jolloin toisiosta lähtee täysi virta.

Mittauksella havaitaan toision tyhjäkäyntijännitteen olevan 42 V. Toisiovirtaa muuntaja pystyisi hetkellisesti tuottamaan luokkaa 100 A mikäli vain verkkosulake sen kestää. Toisioteho kun on tällöin luokkaa 4,2 kVA ja ensiövirta jo 18 A. Tällaiselle ilmapölymuuntajalle on ominaista lähtöjännitteen putoaminen jyrkemmin lähtövirran funktiona kuin tavallisella muuntajalla. Sopivan keinokuorman puutteessa tätä ei nyt alettu kuitenkaan kokeilemaan.

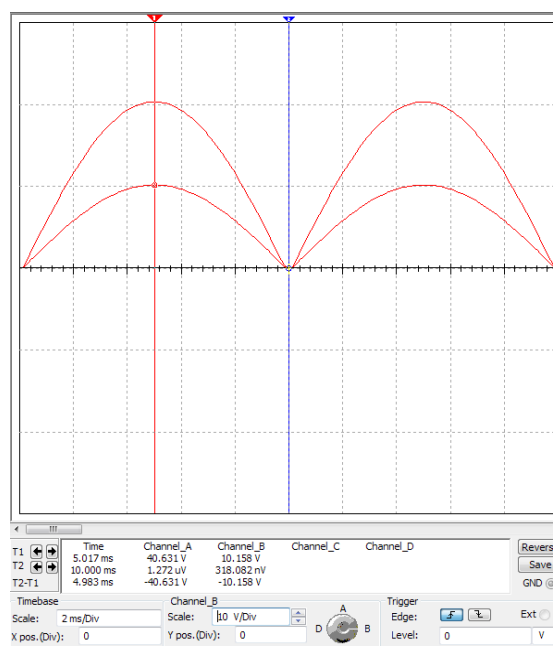
1.2 Lohko B: Tasasuuntaus

Muuntajan toision vaihtojännite tasasuunnataan puolijohdediodien avulla yksinkertaisella siltakytkennällä.



Kuva 11: Simuloitu piiri, lohkot A ja B - 1-vaiheinen kokoaaltotasasuuntaaja

Tasasuuntauksen tuloksena saadaan sykkivää tasajännitettä jonka tehollis- ja huippuarvot ovat samat kuin muuntajan toiossa, mutta jännitteen napaisuus nimelliseen nollatasoon verrattuna ei vaihtelee.

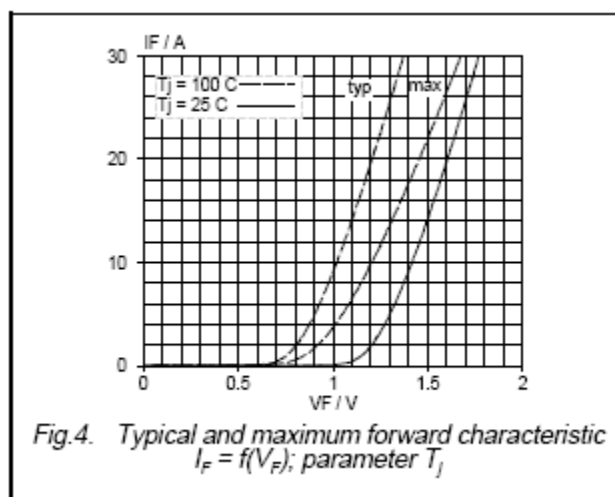


Kuva 12: Muuntajan toisiojännite ja tasasuunnattu jännite

Kuva 11 esittää esimerkkikytkentää johon on nyt lisätty tasasuuntaussillan diodit ja $4\ \Omega$ kuorma tuottamaan 10 A nimellisvirran. Virtuaalioskilloskoopin kanava B on kytketty virtamuuntajalla (XCP1) mittaamaan kuormalle menevää virtaa. Virtamuuntajan muuntosuhde on 1 V/A. Kuva 12 nähdään että sekä jännite että kuorman virta ovat keskenään samassa tahdissa eli samanvaiheiset ja vaihtelevat huippuarvon ja nollan välillä 10 ms jaksoissa, siis 100 kertaa sekunnissa. Ylempänä jännitekäyrä, herkkyys 20 V/div, alempana virtakäyrä, herkkyys **10 A/div**. Aika-akseli on 2 ms/div.

1-vaiheinen kokoaaltotasasuuntaaja koostuu neljästä yksittäisestä Kuva 11 mukaisesti kytketystä diodista. Jokaisen diodin tulee estosuunnassa kestää muuntajan toision huippujännite ja niiden virrankeston tulee olla vähintään suotokondensaattorin varausvirran suuruinen, mielummin yli. Kondensaattorin varausvirtaan palataan suodatusta käsittelevässä kappaleessa.

Jännitelähteen virran kasvaessa kasvaa siis myös vaatimus diodin virrankestonle. Saattaa syntyä houkutus kytkeä diodeja rinnan jotta ne jakaisivat virran keskenään ja selvittäisi pienemmillä ja halvemmilla komponenteilla. Tähän ei kuitenkaan pidä lähteä koska ajatus ei toimi odotetulla tavalla seuraavassa esitettävästä syystä.



Kuva 13: Tyypillisen tasasuuntausdiodin myötäsuuntainen johtokäyrä

Kuva 13 esittää erään tyypillisen tasasuuntausdiodin läpi kulkevaa virtaa sen johtosuunnan napajännitteen funktiona. Rinnankytketyillä diodeilla on pakosta sama napajännite, mutta komponenttien valmistushajonnan vuoksi ne eivät tuolla napajännitteellä mitenkään välttämättä läpäise samaa virtaa. Tarkasteltaessa kuvan käyriä nähdään kuumen diodin (katkoviivat = 100 C) johtavan samalla napajännitteellä reilusti enemmän kuin kylmän diodin. Vaikkapa 1,2 V jännitellä virta on 25 asteen lämmössä

vain n. 2 A mutta 100-asteisella diodilla jopa 20 A eli kymmenkertainen. Lisäksi kuvasta nähdään, että 100 asteen lämmössä tyypillinen ja maksimikäyrä eroavat lähes 10 A. Tämä tarkoittaa sitä, että diodit eivät tule jakamaan virtaa keskenään tasan. Lisäksi syntyy ilmiö nimeltä *thermal runaway* eli kuumen rinnankytketyistä diodeista johtaa parhaiten ja kahmii virtaa itselleen kuumeten lisää. Lopputuloksena käytännössä kaikki virta kulkee kuumimman diodin läpi joka lopuksi tuhoutuu. Seuraavaksi kuumimmalle käy samoin jne kunnes kaikki ovat kärehtäneet. Puolijohteita ei siis voi ilman muuta rinnankytkä ja diodit



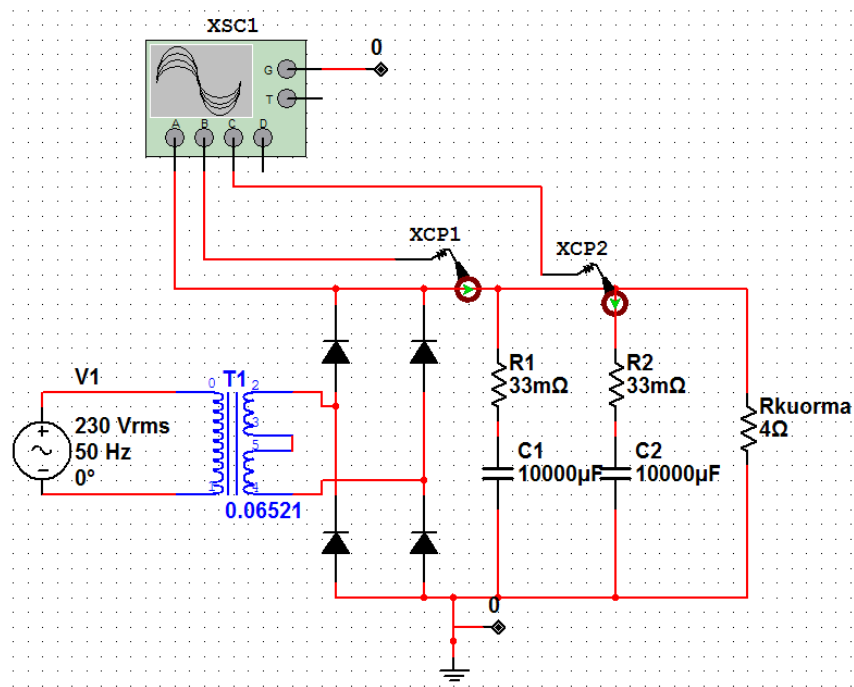
Kuva 14: Tyypillinen kokoaaltodiodisilta

onkin mitoitettava yksittäin kestämään maksimivirta.

Kuva 14 on 50 A 1000 V eristetty diodisilta. Sen voi siis suoraan ruuvata kiinni sopivaan jähdytyselementtiin. Muunkinlaiset ratkaisut tulevat kyseeseen, mutta mitä tulee mitoittamiseen niin seuraavassa tulee esiin asiaan vaikuttavia tekijöitä jotka pitää huomioida. 50 A olisi ihan sopiva silta esimerkkiprojektin.

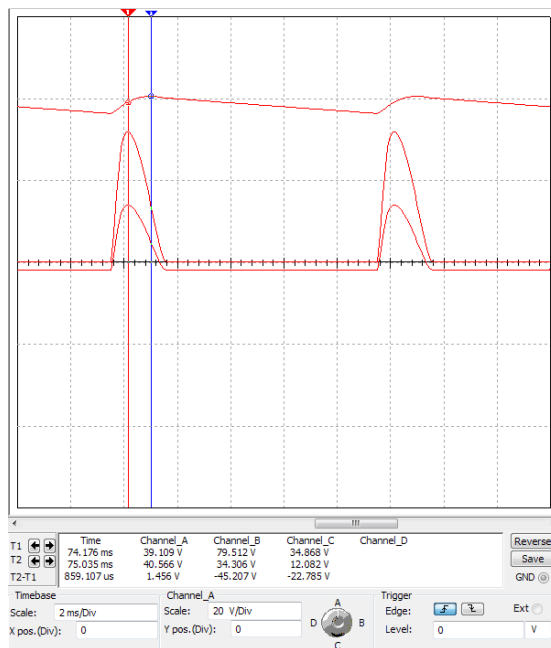
1.3 Lohko C: Suodatus

Tasasuuntauksen jälkeen saatu sykkivä tasajännite tulee vielä siistiä ennenkuin se kelpaa lopulliseen tarkoitukseensa. Tarvitaan siis ainakin suodatus jolla jännitekäyrän minimiarvoa nostetaan niin ettei se käynnollässa vaan jossain sallitussa minimiarvossa. Suodatus toteutetaan kondensaattoreilla jotka syöttävät kuormalle virran jännitekäyrän sillä osalla jonka aikana tasasuuntaajan lähtöjännite alittaa kondensaattorin napajännitteen (Kuva 17, punainen käyrä).



Kuva 15: Simuloitu piiri - lohkot A,B ja C - suodatus

Suodatuslohkoon on valittu 2 * 10000 µF suotokondensaattorit ja niille on simuloitu isoille alumiinielektrolyyteille tyypillinen 33 mΩ ESR eli ekvivalentti sarjaresistanssi, josta lisää myöhemmin.



Kuva 16: Kondensaattorin virta

Simuloidussa skoopikuvassa jälleen ylimpänä positiivinen syöttöjännite joka on nyt yhteinen sekä diodisillalle, suotokondensaattoreille että kuormalle. Käyrän herkkyys edelleen 20 V/div. Havaitaan heti ettei jännite enää putoa nollaan kuten aiemmin. Suotokondensaattorit ylläpitävät nyt lähteen napajännitettä yli koko jakson. Jännitekäyrä saavuttaa edelleen noin 42 V huippuarvon.

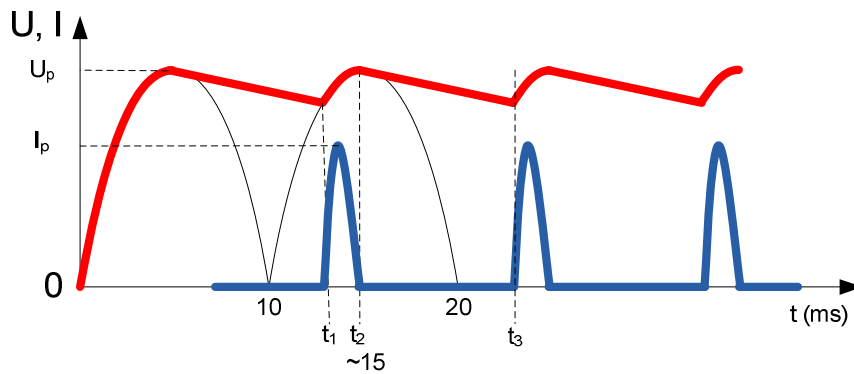
Keskimmäisessä käyrässä virtamuuntaja XCP1 mittaa edelleen kanavassa B tasasuuntaajalta lähtevää virtaa mutta nyt herkkyydellä **50 A/div**.

Alimmassa käyrässä virtamuuntaja XCP2 mittaa kanavassa C suotokondensaattorille menevää ja siitä lähtevää virtaa samoin herkkyydellä **50 A/div**.

Havaitaan heti, että virran käyrämuoto kanavassa B on muuttunut eikä ole enää samanmuotoinen jännitekäyrän kanssa. Huippuarvo on kasvanut radikaalisti samalla kun johtavuusaika eli pulssisuhde on kaventunut.

Jännitekäyrän suhde alkuperäiseen tasasuunnattuun jännitekäyrään sekä tasurin virran vaiheistuminen selviävät Kuva 17.

Suotokondensaattorit siis varautuvat jokaisella puolijaksolla (sinipuoliaallolla) tasasuuntaajan huippujännitteeseen U_{p+} . Varausvirtaa rajoittavat ainoastaan kondensaattorin sisäinen resistanssi, joka yleensä ilmoitetaan suurena ESR (Equivalent Series Resistance - vastaava sarjaresistenassi) sekä käytännön kytkennän johdin- ym resistanssit ja induktanssit. Koska ESR on varsin pieni varautuu kondensaattori käytännössä hyvin lähelle huippujännitettä.



Kuva 17: Suotokondensaattorin jännite- ja virtakäyrät

Kondensaattorin varaus- ja purkutapahtuman ymmärtäminen on tärkeää jännitelähteen mitoituksen kannalta. Käydään se siis läpi Kuva 17 avulla. Jatkuvuustilassa vakiokuormalla varaus- ja purkujaksot toistuvat keskenään samanlaisina kuten kuvassa aikajaksolla $t_1 - t_3$.

1. Ajanhetkellä t_1 tasasuuntaussillan jännite (kuvan musta käyrä) saavuttaa ja ylittää kondensaattorin senhetkisen napajännitteen (punainen käyrä). Silta alkaa syöttää varausvirtaa kondensattoriin jolloin sen jännite nousee seuraten (melko) tarkasti sillan jännitekäyrää.
2. Ajanhetkellä t_2 (tai välittömästi sen jälkeen) sillan napajännite kääntyy taas laskuun ja jännite alittaa kondensaattorin napajännitteen jolloin varausvirta laskee nolnaan.
3. Ajanhetkien t_2 ja t_3 välillä kuorma saa virtansa yksinomaan suotokondensaattorien varauksesta jolloin varauksen purkaessa kondensaattorin napajännite laskee, kunnes...
4. ...ajanhetkellä t_3 sillan lähtöjännite jälleen ylittää kondensaattorin jännitteen ja jakso toistuu.

Mikä sitten on napajännitteen alin arvo juuri ennen seuraavan varausjakson alkua? Tämähän on samalla lähteen alin jännite jonka kuorma näkee.

Kondensaattorin napajännite ajanhetkillä t_1 , t_3 jne on laskenut jännitteeseen jonka määräävät toisaalta jännitelähteeseen kytketty kuorma ja toisaalta kondensaattorin kapasitanssi seuraavasti:

U_c	Konkan hetkellinen napajännite (V)
U_p	konkan napajännitteen maksimi ajanhetkellä t_2 (V)
$i(t)$	hetkellinen virta ajan funktiona (A)
I_k	Kuorman virta (vakio) (A)
C	kondensaattorin kapasitanssi (F)
Q	kondensaattorin sähkövaraus (As)

Purkausjakson alkaessa ajanhetkellä t_2 kondensaattorissa on varaus $Q = U_p C$. Varaus purkautuu ajanhetkien t_2 ja t_3 välillä virralla I_k , jolloin kondensaattorin jännite laskee seuraavan lausekkeen mukaisesti

$$U_c = U_p - \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_3} i(t) dt$$

Virtaintegraalin laatu yhtälössä on ampeerisekunteeja eli se on sähkövaraus. Se siis kuvaa sitä varausta joka konkasta puretaan jakson aikana. Varauksen suuruus ajanhetkien t_2 ja t_3 välillä voidaan likiarvoistaa seuraavasti: Virta oletetaan vakioksi I_k^2 ja aikaväli t_2 - t_3 laskematta³ karkeasti heittäen 8ms. Tällöin siirtyvä

² Vaikkei se tarkkaan ottaen sitä olekaan. Virhe on kuitenkin näin lyhyellä aikavälillä merkityksetön.

³ Kondensaattorin purkauskäyrän ja tasurin sinipuoliaallon jännitekäyrien leikkauspisteen algebrallinen laskenta menee tarpeettoman korkeaksi matikaksi tätä esitystä varten. Tuo likiarvo on ihan tarpeeksi lähellä.

varaus on $(I_k * 0,008) \text{ As}$ ja konkan jännite laskee $\frac{1}{C} I_k * 0,008$. Oletetaan virta 10 A ja kapasitanssi 20000 uF jolloin alenema on $U_c = U_p - \frac{1}{0,02 F} * 10 A * 0.008 s$; $U_c = U_p - 4V$. Napajännite ehtii siis noilla arvoilla pudota noin 4 V alemmas kuin tasasuuntaajan huippujännite.

Kondensaattoria varaava ja sitä purkava virta muodostuu kahden komponentin summana. Toisaalta jännitelähteen kuorma purkaa kondensaattoria enemmän tai vähemmän vakioresistanssilla samalla kun tasurisilta varaa sitä jaksottaisesti kuten edellä on nähty. Simuloidussa piirissä on nyt lisätty toisen suotokondensaattorin haaraan virtamuuntaja XCP2 jolla mitataan kondensaattorin näkemä virta. Se on eri asia kuin kuorman näkemä virta kuten seuraavasta tullaan huomaamaan.

Kuva 16 ($U_p = 40 \text{ V}$, $I_k = 10 \text{ A}$, $R_k = 4 \Omega$) havaitaan kondensaattorin virran (alin käyrä, 50 A/div, 2ms/div) olevan suurimman osan aikaa negatiivinen ja vain lyhyt varauspulssi on positiivinen. Negatiivinen virta kulkee kondensaattorilta kuormaan päin ja positiivinen varaa uutta potkua konkkaan. Virta siis pumpkaa 100 Hz taajuudella edestakaisin. Kasvava kuorma kasvattaa kummankin osajakson itseisarvoa ja sitä kautta kondensaattorin kokemaa vaihtovirtaa eli rippleä (ripple current). Tärkeä mutta liian usein unohdettu kriteeri suotokonkan mitoituksessa on sen ripple-virran kesto. Tuo edestakainen virta on vaihtovirtaa jonka RMS-arvo ja kondensaattorin ESR eli näennäinen sarjaresistanssi määräävät kondensaattorissa tapahtuvan tehohäviön $P_d = I_{RMS} * R_{ESR}$. Kyseisen esimerkin arvoilla, käytettäessä rinnan kahta 10000µF konkkaa joilla ESR 33 mΩ, saadaan kummallekin erikseen ripplevirtaa 11,2 A. Tämä on sen verran reilu virta, että ihan hento tusinakonkka ei muodostu pitkäikäiseksi. Konkkat hukkaavat häviölämpönä 4,13 W tehon ja ripple-virran huippuarvo lpp n. 40 A rasittavat konkan sähköisiä ja mekaanisia rakenteita. Pitkäaikaista käyttöä varten kannattaa siis valita komponentit melko tukevasta mallisarjasta.



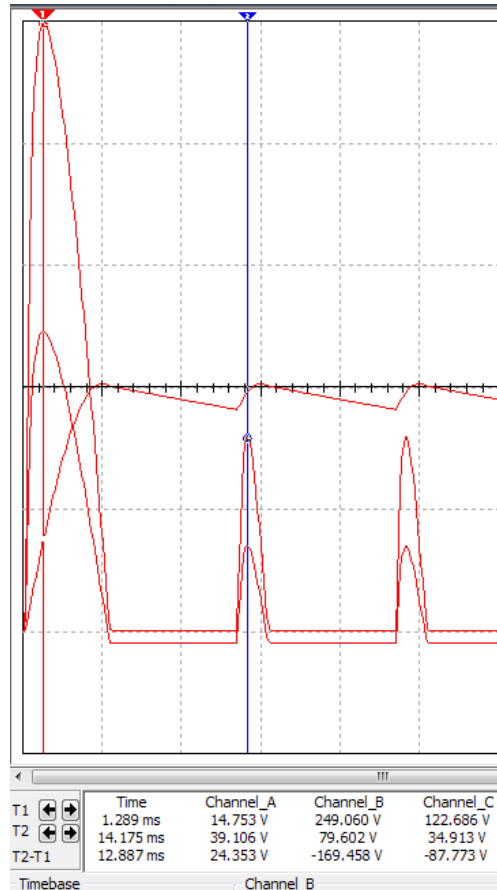
Kuva 18: Hyvä ja ei niin hyvä suotokondensaattori

Kuva 18 ei ole mainos mutta esittää vasemmalla kondensaattoria, jolla on mahdollisuudet selvittää suototehtävässä vastaan tulevasta rippelivirrasta. Oikeanpuoleisella komponentilla ei mahdollisuuksia hirveästi ole vaan se tulee tuhoutumaan ennen pitkää. Oikotietä onneen ei ole vaan sitä saa mistä maksaa.

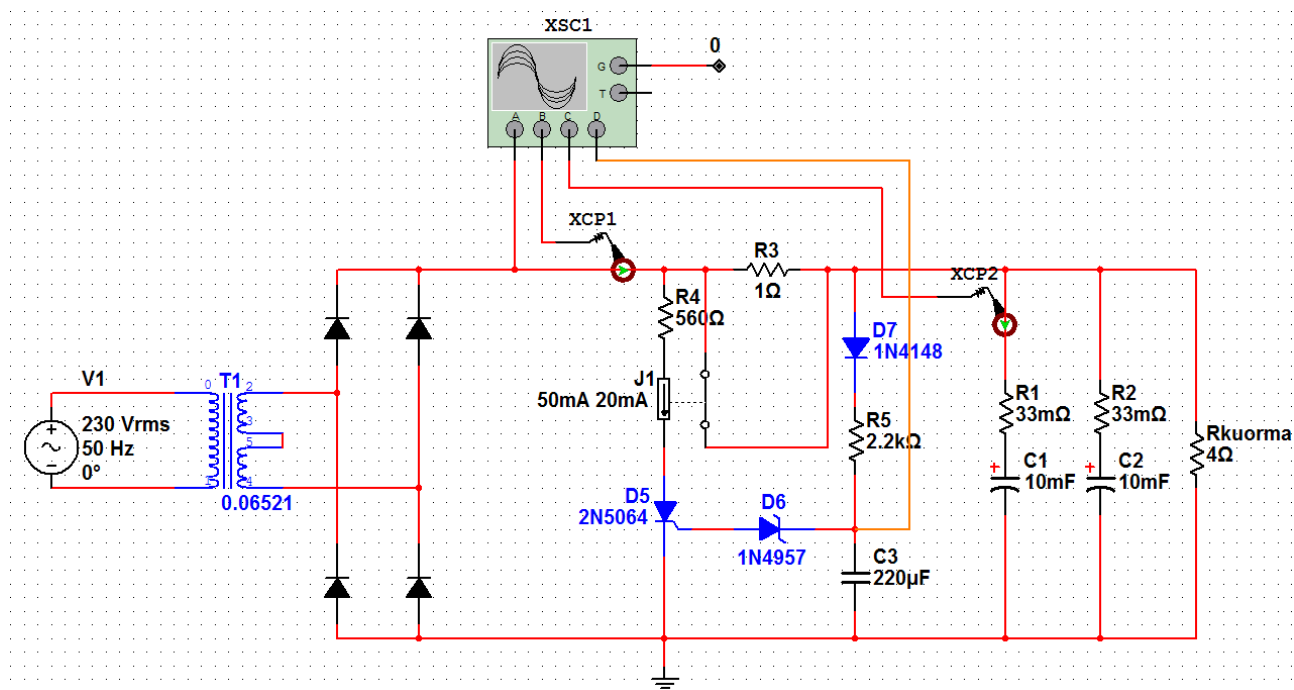
1.4 Lohko C bis: Syöksyvirran rajoitus

Tasasuuntaajan virta on siis suodatuksen yhteydessä myös muuttanut muotoaan. Tästä seuraa huomioitavia seikkoja:

- Huomattavasti kasvaneet huippuvirrat - tässä simulaatiossa $I_p = 79,5 \text{ A}$ vaikka kuorman tehollinen virta on vain 10 A . Tällä on oleellinen vaikutus tasasuuntausdioiden mitoitukseen
- Isoilla suotokondensaattorin arvoilla syntyy erittäin suuret syöksyvirrat käynnistettäessä jännitelähde kondensaattorit täysin purkautuneina. Kuva 19 ensimmäinen tasasuunnattu puolialto varaa kahta tyhjää $10000 \mu\text{F}$ kondensaattoria $33 \text{ m}\Omega$ sarjaresistanssin läpi. Ilman muita resistansseja ja induktansseja olisi syntyvän varausvirtapiikin huippuarvo 250 A ! Todennäköisesti käytettyjen komponenttien mitoitus ei mahdollista näin korkeaa virtaa ja hyvä niin, mutta sulakkeet ja muut suojakomponentit ovat kyllä vaaravyöhykkeessä.



Kuva 19: Käynnistysvirtapiikki verkon nollakulmalla

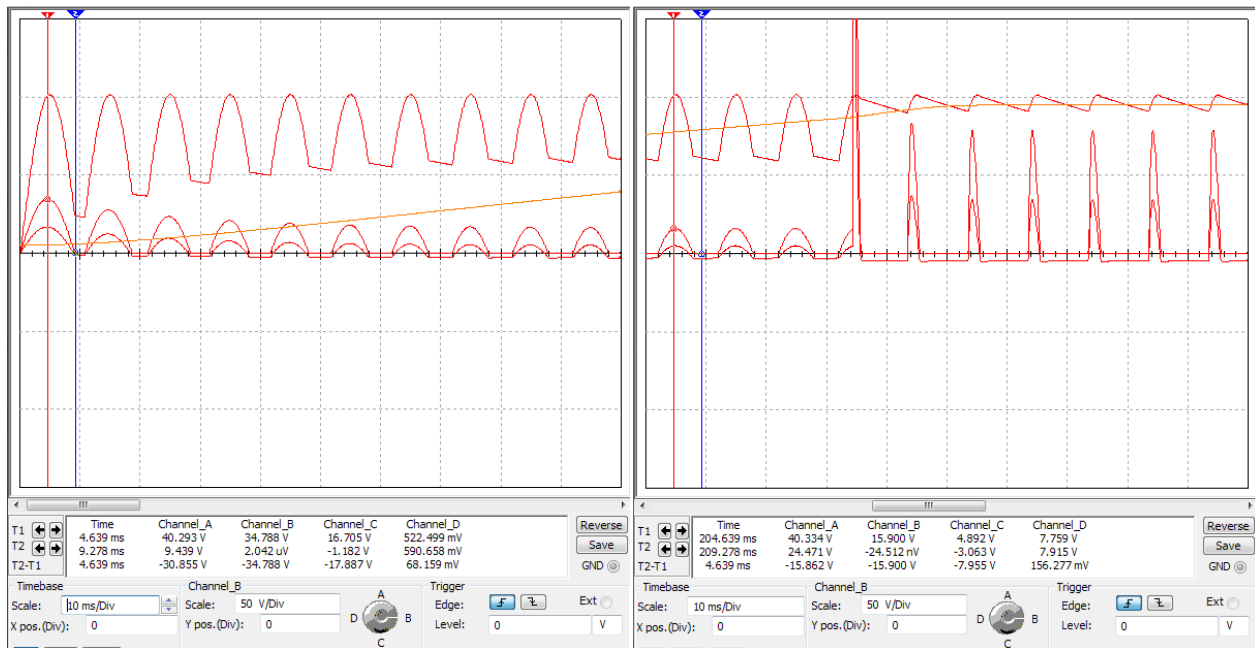


Kuva 20: Piiri varustettuna syöksyvirran rajoituksella

Syöksyvirta saadaan helposti kuriin lisäämällä kondensaattorien eteen virtaa hillitsevä etuvastus - Kuva 20 vastus R3. Asiaa mutkistaa kuitenkin tarve päästä vastuksesta eroon kun konkat ovat varautuneet kohtuulliseen tasoon jolloin vastuksella ei ole enää niin väliä ja se vain nostaa lähteen sisäistä resistanssia. Tätä varten tarvitaan yksinkertainen ajastin ja ohikytkentä jolla vastus oikosuljetaan sen tehtyä tehtävänsä.

Vastuksen voisi oikosulkea helposti tyristorin tai triacin avulla, mutta niiden häviötehon aiheuttaman lämpenemisen välttämiseksi tässä on käytetty relettä, jota simuloi virtaohjattu kytkin J1. Kytкин sulkeutuu 50 mA virralla ja avautuu kun virta alittaa 20 mA. Useat oikeat releet ovat varsin lähellä tätä. Kytkimen virran rajoittaa etuvastus R4 ja sitä ohjaa tyristori D5. Tämä puolestaan saa ohjauksensa ajastimelta zeneridiodin D6 kautta (n. 9V zeneri).

Ajastimena toimii vastuksen R5 ja kondensaattorin C1 muodostama yksinkertainen RC-aikavakio. Diodi D7 ei ole välttämätön, mutta estää C3:a purkautumasta takaisinpäin heti alussa. Kun konkan C3 napajännite on noussut yli zenerin D6 estojännitteen, alkaa tyristorin hilavirta kulkea ja se liipaisee hetimiten. Kytкин J1 vetää sulkien kontaktinsa jolloin R3 oikosulkeutuu eli etuvastus on pois piiristä, mikä oli tarkoituskin. Kytkentä on lievästi herkkä lähteen kuormalle, mutta sillä ei ole väliä koska poiskytkennän tarkka ajankohta ei ole mitenkään kriittinen, kunhan se tapahtuu ilman tarpeetonta hidastelua.



Kuva 21: Syöksyvirta rajoitettu etuvastuksella

Kuva 21 nähdään ongelman poistuneen, varsinaista syöksyvirtaa ei enää esiinny. Tasasuuntaussillan ensimmäinen virtapuoliaalto vasemmassa kuvassa saa maksimin 34,7 A mikä on täysin OK. Jännitekäyrästä näkyy kuinka kondensaattorien jännite nousee pulssi pulssilta, mutta ei etuvastuksella saavuta täyttä siltajännitettä. Oikeassa kuvassa näkyy tyristorin liipaisuhetki jonka jälkeen kondensaattorit varautuvat ilman etuvastusta. Kytchentähetkellä näkyvä piikki ei ole todellinen vaan SPICE:n tuottama artifakti, se kun ei oikeasti osaa käsitellä epäjatkuvia kytkinelementtejä.

1.5 Lohko D: Regulointi

Tämä kappale täydennetään seuraavassa vaiheessa.

2 Kotelointi, Suojamaadoitus ja häiriönpoisto (alustavaa)

Jännitteisten osien kosketteleminen on estettävä joten laite on koteloitava asianmukaisesti.

Lähtökohtaisesti on kaksi vaihtoehtoa; joko muovikuorinen suojaeristetty kotelointi, tai metallikuorinen suojamaadoitettu kotelointi. Molemmat ovat mahdollisia ja seuraavassa käydään läpi muutamia vastaantulevia seikkoja valinnan perusteeksi.

Ominaisuus tai huomioitava seikka	Suojaeristetty kotelo	Suojamaadoitettu kotelo
Kotelon materiaali	Materiaali oltava hyväksyttyä eristemateriaalia; käytännössä vain valmiskotelot tulevat kyseeseen	Metallinen kotelo jossa luotettava sähköä johtava yhteys on varmistettu kaikkien osien) välillä(erityisesti kannen/oven ja kotelon välillä).
Mekaaninen tukevuus	Pienempiin toteutuksiin riittävä. Järeämissä ratkaisuissa tulee komponenttien massa eteen - muovi ei välttämättä kestä useiden kilojen painoisten muuntajien ripustamista.	Teräslevykoteloissa ei rakenteen tukevuus ole rajoite; tulee vain valita tarkoitukseen sopiva malli.
Maadoitus	Suojaeristettyä kotelo ei maadoiteta. Se ei ole edes mahdollista koska kotelo on eristemateriaalia. Maadoitetun liitännän käyttö on silti mahdollista, mikäli kotelon sisäisiä rakenteita halutaan kiinnittää maatasoon häiriöiden vähentämiseksi.	Maadoitus on välttämätön ja toteutettava huolella. Laitteen saa kytkeä vain suojamaadoitetulla liitäntäjohdolla.
Sähkömagneettiset häiriöt	Kotelon materiaali ei juuri anna suojaa häiriöitä vastaan eikä estä laitteen synnyttämien häiriöiden säteilyä ympäristöön.	Johtava kotelo maadoitettuna estää tehokkaasti häiriösäteilyn läpäisyä molempiin suuntiin.
Häviölämmön poisto	Muovimateriaalit ovat yleensä myös hyviä lämmöneristeitä. Hukkalämmön poistaminen on vaikeaa jos siihen joudutaan erityisesti paneutumaan. Kotelon sisälämpötila karkaa helposti käsistä tehokkaammilla laitteilla.	Teräspelti tai alumiini on hyvä lämmönjohde jo sellaisenaan. Hukkalämpö poistuu tehokkaasti seinämien läpi johtumalla. Lisäjähdytysjärjestelyt helpommin toteutettavissa kuin suojaeristetyille kotelolle.
Sähköturvallisuus	Kotelon runko ei voi tulla jännitteiseksi vikatilanteessa koska se on eristemateriaalia. On tarkkaan huolehdittava, ettei mikään johdemateriaali kuten kiinnitysruuvi tms. läpäise kotelo jolloin se voisi tulla jännitteiseksi kotelossa irtoavan johdon tms koskettaessa sitä.	Kotelon runko voi tulla jännitteiseksi vikatilanteessa. Tässä tapauksessa maadoitus toimii suoja mekanismina aiheuttaen johdonsuojan laukeamisen ja/tai sulakkeen palamisen. Maadoituksen on siis varmuudella oltava kunnossa. Suositeltava ajatus on käyttää vikavirtasuojaa jolloin suoja estää sellaiset henkilöturvallisuuden kannalta vaaralliset osittaiset maasulut jotka eivät laukaise varsinaista johdonsuojaa.

Jatkuu..