

Kolmivaihevaihtosuuntaaja

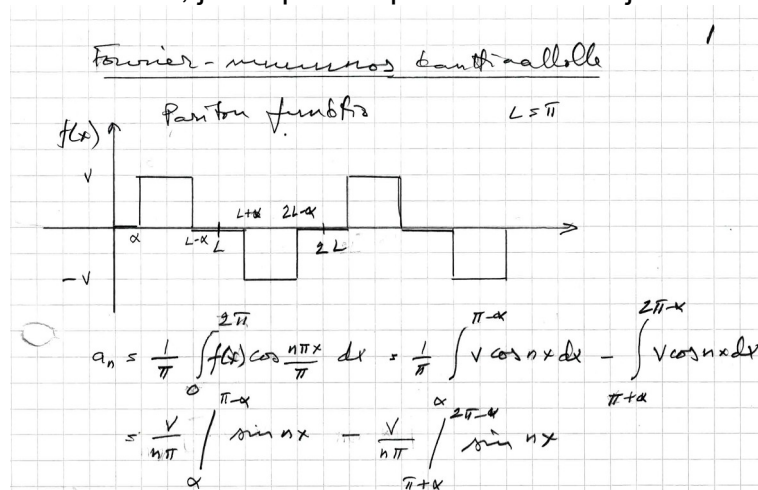
Ajatus sellaisen rakentamisesta lähti liikkeelle syksyllä esitetyistä arvioista, että talvella saattaa esiintyä sähkökatkoksia. Omakotitalossani lämmönsiirto kattilasta varaajaan tapahtuu latauspumpun avulla ja se on kolmivaiheinen oikosulkumoottori. Sen korvaaminen yksivaiheisella ja asennustyöt olisivat maksaneet luokkaa 700 €. Valmiita pieni-tehoisia vaihtosuuntaajia en löytänyt markkinoilta, vain kilowatista ylöspäin, eikä valmiita piirustuksiakaan. Kilowattiluokan laitteen tyhjäkäyntivirta on akkukäyttöisenä suuri. Siksi päätin suunnitella ja rakentaa laitteen itse. Piirejä suunnitellessani kokeilin erilaisia kytkentöjä ja niiden toimintaa. Jos joku rakentaa tämän laitteen, voi siitä jättää lisäosia pois.

Taustamatematiikkaa

Halusin kiinnittää huomiota myös sähkön laatuun. Kanttiaalto muuntajan ensiössä antaa todella karkeaa vaihtovirtaa. Jo vuosia sitten laskin kanttiaallon Fourier-muunnoksen pulssin pituus muuttujana. Huomasin, että asettamalla pulssin pituudeksi 120° , eniten vääristymää aiheuttava kolmas harmoninen jää kokonaan pois ilman suodatusta. Tämän olivat ymmärtäneet aiemmin jo muutkin, mutta itse tehty laskelma innoitti rakentamaan.

Mikä hyvänsä jaksollinen signaali voidaan esittää sinimuotoisten signaalien, perustaajuuden ja harmonisten summana. Eri harmonisten amplitudit voidaan laskea Fourier-muunnoksen avulla. Se on voimakas työkalu määrittäessä erilaisten signaalien vaatimaa kaistaleveyttä tai sitten suodattimissa harmonisten vaimentamista.

Fourier-muunnos kanttiaallolle, jossa pulssin pituus on muuttujana.



Kertoimet ovat a_n ovat nollia.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin \frac{n\pi x}{\pi} f(x) dx$$

$$= \frac{V}{\pi} \int_{\pi}^{\pi-\alpha} \sin nx dx - \frac{V}{\pi} \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} \sin nx dx$$

$$= -\frac{V}{n\pi} \left[\cos nx \right]_{\pi}^{\pi-\alpha} + \frac{V}{n\pi} \left[\cos nx \right]_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha}$$

$$= \frac{V}{n\pi} [\cos n\alpha + \cos nx + \cos nx + \cos n\pi \cos n\alpha]$$

$$= \frac{2V}{n\pi} \cos n\alpha [1 \pm \cos n\pi]$$

$$b_n = \frac{4V}{n\pi} \quad n=1, 3, 5, \dots$$

$$b_n = 0 \quad n=2, 4, 6, \dots$$

Fourier -sarja

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi x}{\pi} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4V}{(2n+1)\pi} \cos(2n+1)\alpha \sin \frac{(2n+1)x}{\pi}$$

$$n=0 \Rightarrow \frac{4V}{\pi} \cos \alpha \sin x \quad n=1 \Rightarrow \frac{4V}{3\pi} \cos 3\alpha \sin 3x$$

$$n=5 \Rightarrow \frac{4V}{5\pi} \cos 5\alpha$$

Nollataan 3. harmoninen

$$\Rightarrow \frac{4V}{3\pi} \cos 3\alpha = 0 \quad \cos 3\alpha = 0 \quad \alpha = 90^\circ/3 = 30^\circ$$

$$n=1 \Rightarrow \frac{4V}{\pi} \cos 30^\circ = 1,1034 \quad \uparrow 1,217 \text{ V}^2$$

$$n=3$$

$$n=5 \Rightarrow \frac{4V}{5\pi} \cos 150^\circ = -0,221V \quad \uparrow 0,0488 \text{ V}^2$$

$$-0,628 \quad 0,394$$

$$n=7 \Rightarrow \frac{4V}{7\pi} \cos 210^\circ = -0,158V \quad \uparrow 0,025 \text{ V}^2$$

$$n=9 \Rightarrow \frac{4V}{9\pi} \cos 270^\circ = 0$$

$$P_5 + P_7 = 0,0784 \text{ V}^2$$

$$1,295 \text{ V}^2$$

Sitten kolmannen 6%

harmoninen

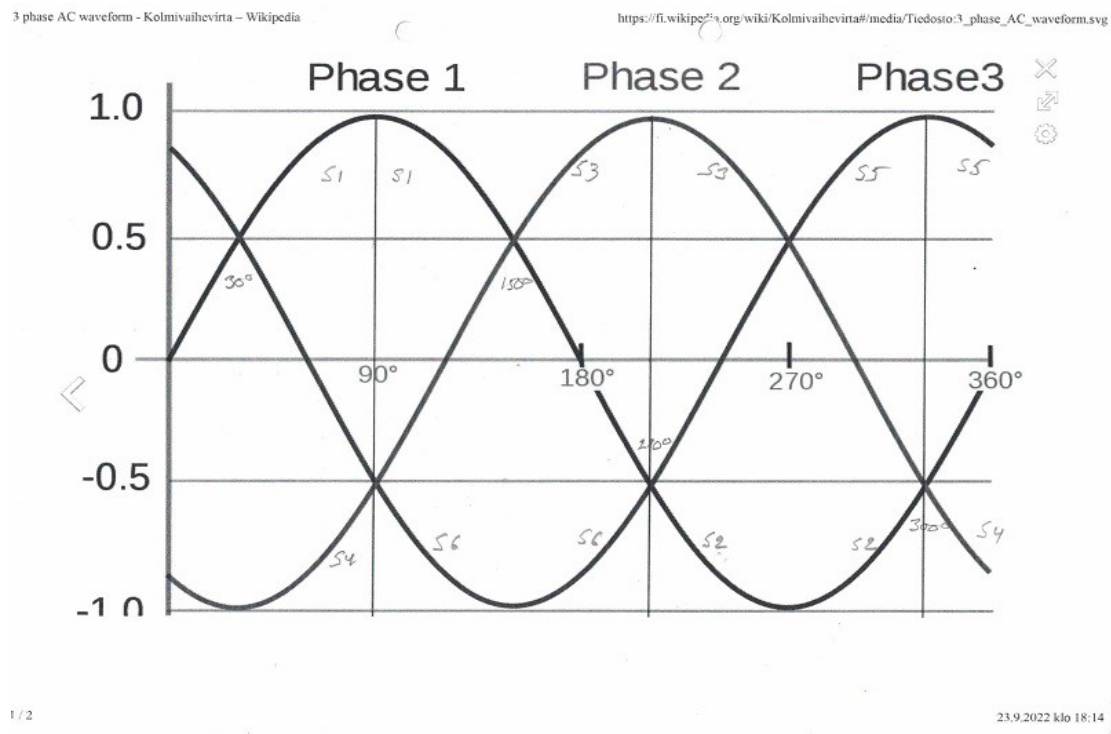
$$THD = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + P_4}{P_1}} = 25\% \quad \text{Harmoninen kolmannen 2\%}$$

Tehoa siirto on 6%

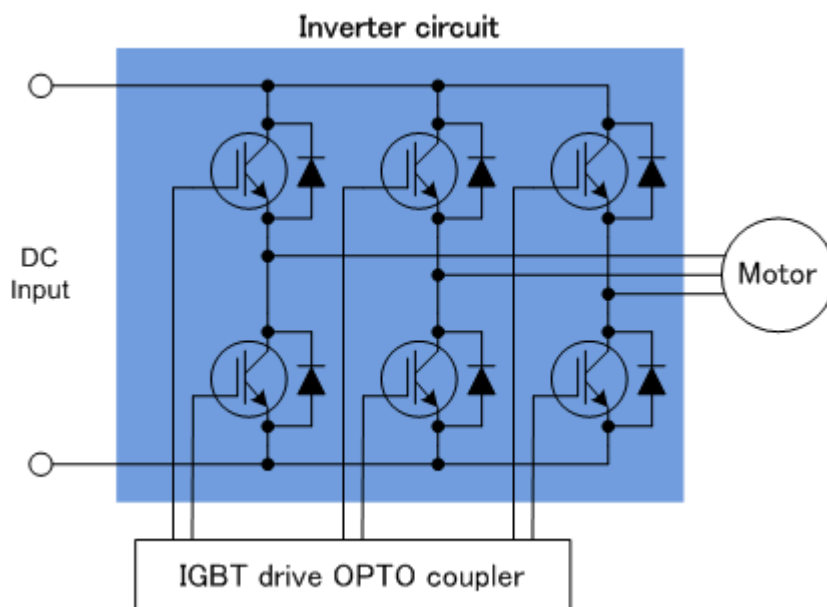
Kolmannen harmonisen amplitudi on $4 \cdot V_{DD} \cdot \cos 3\alpha / (3 \cdot \pi)$. Se menee nolaksi, $\cos 3\alpha = 0$ eli $3\alpha = 90^\circ$ ja $\alpha = 30^\circ$. Näin ollen pulssin pituudeksi tulee 120° . Ulostulojännite on kolmitasoinen $+V_{DD}$ 0 $-V_{DD}$.

Kolmivaihejännitteessä vaihe-erot ovat 120° . Jotta edellä kuvattu pulssijono voitaisiin

muodostaa, on kolmivaihesinijännitteen vaihe jaettava kuuteen osaan kunkin pituuden ollessa 60° . Tarvitaan 6:n ohjattavan kytkimen silta. Ne voivat olla fettejä, tyristoreja, IGBT-puolijohteita tai transistoreja. Ohjaussignaali on siten 6 kertaa sähköverkon taajuus eli 300 Hz.

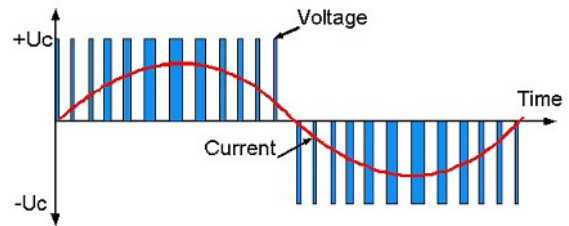
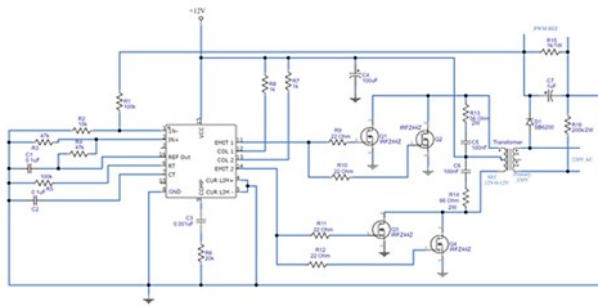


Kolmivaihejännite. Kytkimet S1, S3 ja S5 ovat ylempänä ja S2, S4 ja S6 niiden alapuolella mainitussa järjestyksessä.



Riippuen tarvittavasta jännitetasosta saatetaan tarvita kytkinten ohjaukseen optoelementtejä.

PWM Inverter Circuit

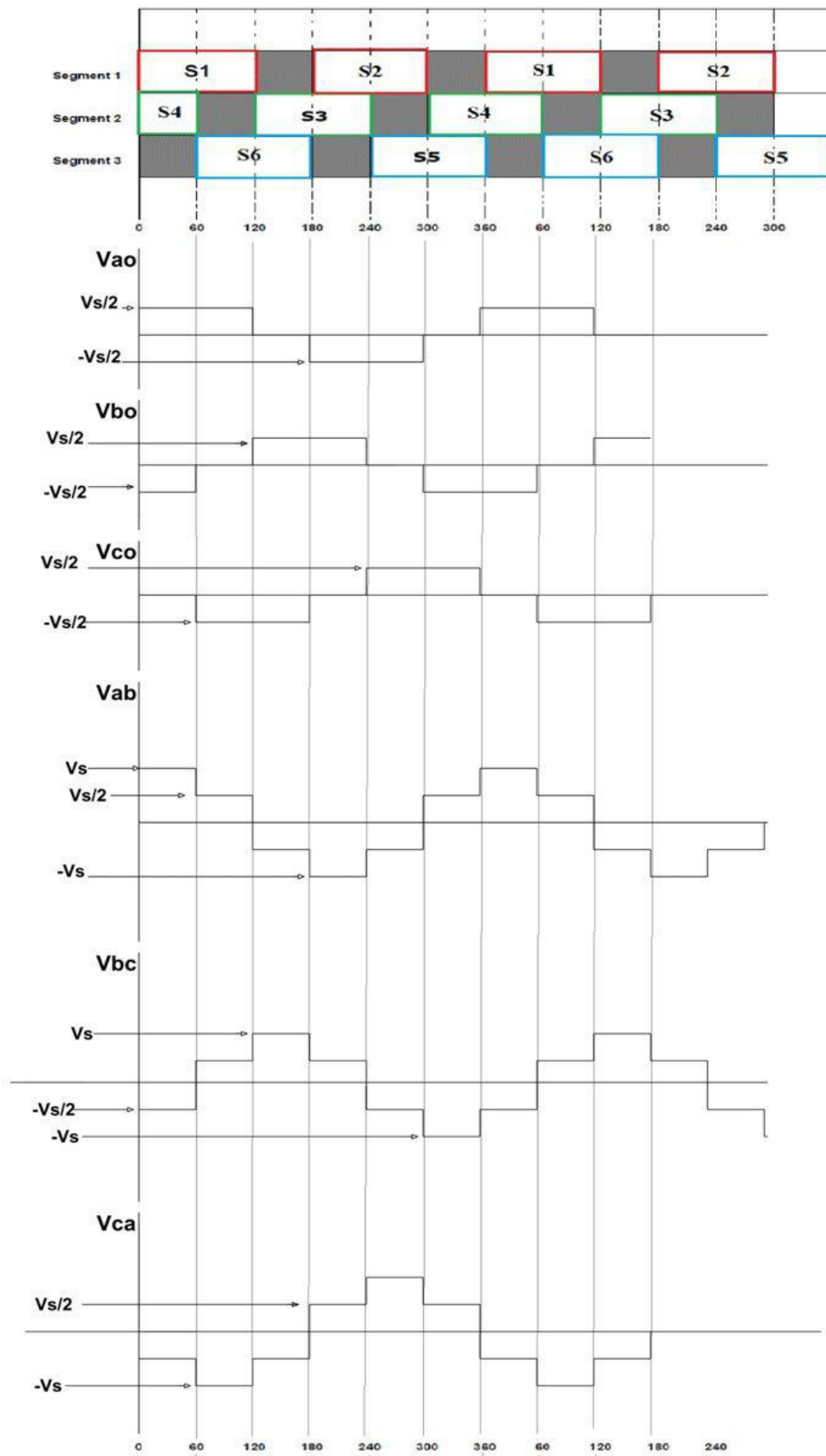


Puhtaan sinin aikaansaamiseksi löytyy valmiita mikropiirejä esim. SG3524 (Partco hinta luokkaa 1,70 €). Siinä hyödynnetään pulssinleveysmodulaatiota (PWM). Sen avulla voidaan tehdä ulostulojännite kuorman suuruudesta riippumattomaksi, mikä on tärkeä etu. On kuitenkin muistettava, että kaikella on hintansa: harmonisia taajuuksia tulee runsaasti. Kolmivaihejännitteen tuottamiseen tarvitaan ilmeisesti kolme tällaista piiriä, mutta niiden vaiheistamiseen en ole toistaiseksi perehtynyt.

Markkinoilla (en Suomesta löytänyt) on myös mikropiiri, kolmivaihesiltaohjain IRS 233(0,2), Hinta luokkaa 5 US \$.

Kytinten asetukset ja jännitteiden muoto ilmenee alla olevasta piirroksesta. Ylimmät kytkimet ovat S1, S3 ja S5 ja alemmat S2, S4 ja S6.

Neliportainen käyrä saadaan kahden kolmiportaisen jännitteen erotuksena.



Kun 3-vaiheulostulo kytketään muuntajan ensiökäämeihin kolmioksi, saadaan ensiön jännitettä korotettua $\sqrt{3}$ -kertaiseksi ja resistiivisiä häviöitä pienennettyä. Samalla kolmitasoinen ensiön signaali muuttuu nelitasoiseksi. Kolmas harmoninen jää edelleen pois, mutta parannusta särössä ei tapahdu. Harmoninen kokonaissärö on matemaattisesti 25 % kummassakin tapauksessa, mutta harmonisten teho on vain luokkaa 6 % kokonaistehosta!

Fourier muunnos kolmitasoisesta jännitteestä on:

$$2\sqrt{3} \times \frac{\sin(x) - \frac{1}{5} \sin(5x) - \frac{1}{7} \sin(7x)}{\pi}$$

Sijoitus $\pi/2$ antaa 1,040. Fourier-muunnos nelitasoisesta jännitteestä on puolestaan:

$$\frac{3 \sin(x) + 3\left(\frac{1}{5} \sin(5x)\right) + 3\left(\frac{1}{7} \sin(7x)\right) + \frac{1}{9} \sin(9x)}{\pi}$$

Sijoitus $\pi/2$ antaa 1,045. Nämä kaksi lukemaa lähenevät toisiaan, jos harmonisten määrää lisätään laskennassa. Harmonisten amplitudin laskeminen tälle aaltomuodolle on työlästä, sillä se vaatii 12 sijoitusta integraaliin jokaisen harmonisen osalta!

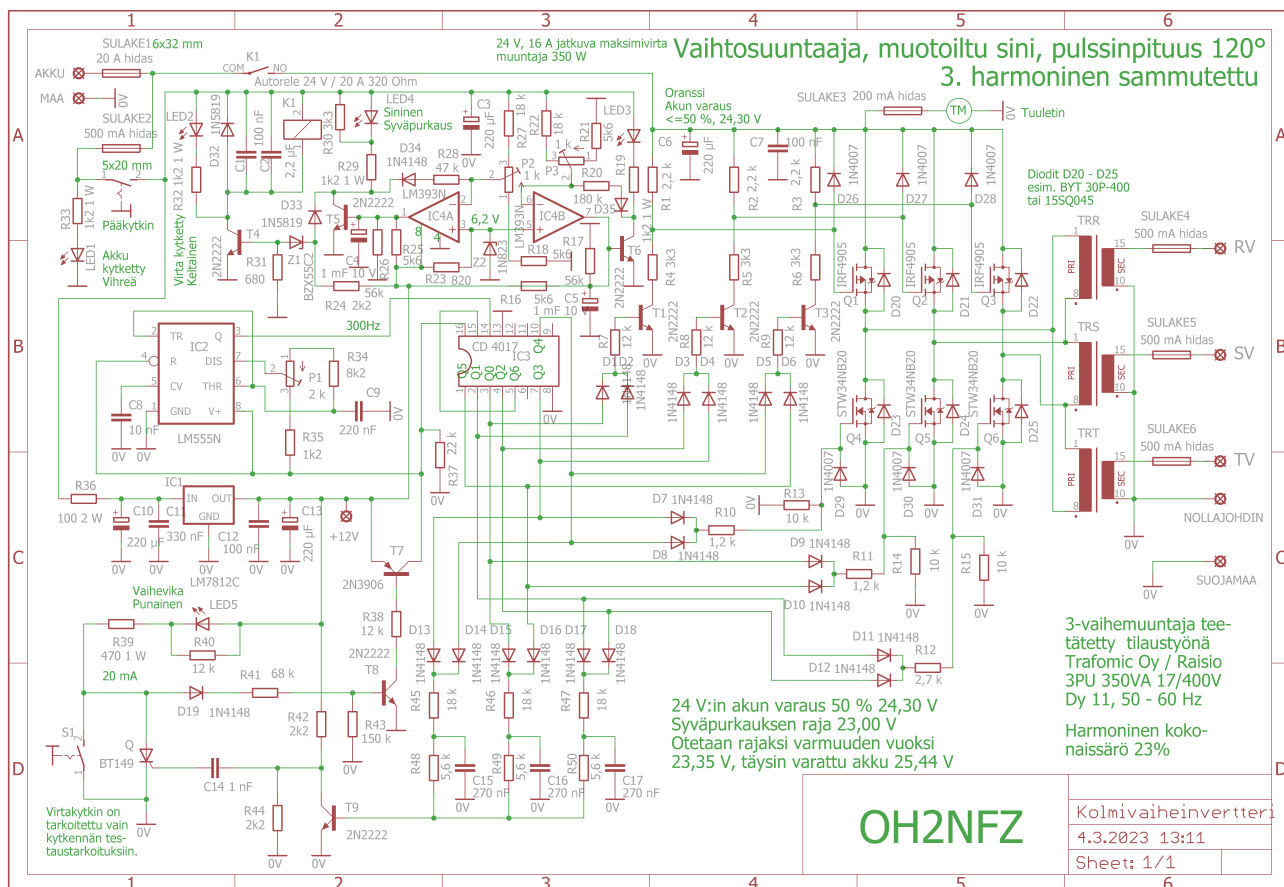
Sinimuotoisesta vaihtojännitteestä puhuttaessa käytetään tehollisarvoja. Siksi akkujen jännite 12,15 V_{DC} (50 %:in varaus, signaalissa 0-taso akkujen kokonaisjännitteen puolivälissä). Toisaalta Fourier-muunnos antaa perustaajuudelle kertoimen $4/\pi = 1,10$, mikä on jaettava $\sqrt{2}$:lla vaihejännitteen tehollisarvon saamiseksi ja ensiön lopullinen jännite on siten kolmiokuormituksessa 12,15 V x 1,10 x $\sqrt{3/2} = 16,4$ V. Muuntajan ensiö mitoitettiin 17 V:iin. Mittaukset tukevat laskelmaa, mutta antavat hiukan suurempia tuloksia. Mitauksissani käytin digitaalista Agilent U3401A-yleismittaria. Analoginen mittari antoi aivan samoja tuloksia. On myös kysymys siitä, miten digitaalimittari määrittelee säröytyneen jännitteen tehollisarvon. Muuntajassa ainakaan alimmat harmoniset eivät suodattuneet pois.

Vaihtosuuntaajan piirikaavio

Aloitetaan kolmivaihesillasta. Alemmat fetit ovat N-kanavaisia ja asennusystävällisiä, sillä niihin saa ruuvikiinnitteisen liitäntäriman. Ylempien fettien ohjaus puolestaan sujuu yksinkertaisimmin, jos ne ovat P-kanavaisia, mutta niiden valikoima on suppeampi ja hinta korkeampi. Valitsemani fetit ovat vaativia asennettavia, sillä äärimmäisten johtimien väli on vain 5 mm ja pitäisi käyttää paksuja asennusjohtoja. Lisäksi tämä malli vaatii alustaan kiille-eristysten, mitä käytetty N-kanavan fetti ei vaadi. Diodien D20-D25 pitää olla erittäin nopeita, mieluummin Shottky-diodeja. Ehkä olisi hyväksi, jos diodit D26-D31 olisivat myös Shottky-mallia. Diodit D1-D18 muodastavat pareittain tai-elimen ohjaamaan kytkinten toimintaa.

Kolmivaihesillan ylemmät fetit voisivat olla ja mieluummin olisivatkin myös N-kanavaisia, mutta tällöin niiden ohjausta varten pitäisi synnyttää syöttöjännitettä 10 V:ia korkeampi käyttöjännite. Koska fettien ohjaus ei tehoja kuluta, tämä voitaisiin tehdä helposti oskillaattorilla ja diodijännitekertojalla.

Trafomic Oy Raisiosta suostuu tekemään muuntajia yksin kappalein yksityisellekin tilaajan oman maun mukaan! Tässä malli 3PU 350VA 17/400V Dy11, 50-60 Hz. Hinta yli 300 €.



300 Hz:n kantiaalto muodostetaan ajastinpiirillä LM555N ja kymmenlaskuria CD 4017 käytetään kuudellajakajana. Kymmenjärjestelmän ulostuloilla ohjataan fettisiltaa. Laskuri ei vaadi käynnistysnollausta tai -asetusta, koska tiloja 7-9 ei käytetä. Ajatellen mahdollista virhettä laskurin tuottamassa pulssijonossa on tehty tilanteelle ilmaisim R45-R48, C15-C17 ja D13-D18. Aikavakiot on laskettu niin, että jos yksikin ohjauspulssi puuttuu, oskillaattori ja laskuri lakkaa saamasta virtaa. T7, T8, T9, Q. Tyristorin Q liipaisu vaatii 6-7 mA virtaa ja myös nopean nousuajan. Nousuaikaa lisäämään tarvittiin kondensaattori C14, sillä se derivoi nousevan signaalin. Liipaisuvirta olisi voinut olla suurempikin ja liipaisu luotettavampaa, mutta säästin (hiilijalanjälki!).

Transistoriketjussa T8 T9 on niin paljon vahvistusta, että sitä piti ajaa alas vastuksilla R43 ja R37. Oskillaattorin ja laskurin virrankulutus on todella olematon! Diodi D19 on osa sammutuspiiriä, sillä Q:n anodi-katodijännite on voltin luokkaa ja ilman sitä transistori T8 alkaa johtaa. Toiminnan pysäytyksen ohjaus olisi voitu viedä myös suoraan transistorille T4, mutta hälytinpiirit rakensin vasta myöhemmin, enkä siksi enää muuttanut kytkentäkaaviota tältä osin. Siis T7 ja T8 ja niihin liittyvät komponentit R38, R41 ja R43 kannattaisi jättää pois. Tyristorin anodilla oleva diodi D19 tulisi kääntää toisin päin ja vetää hyppylanka sen anodilta suoraan zenerin Z1 ja diodin D33 liitoskohtaan. Tällöin fettien hiloille tulisi kylläkin ohjausjännite, mutta niiden käyttöjännite V_{DD} nollaantuisi!

IC4-vertailupiiri on avoin kollektortyyppiä ja siksi tarvitaan ylösvetovastukset R16 ja R25. Avoimella kollektorilla on omat etunsa. Kollektoria voidaan käyttää ei-tai-piirinä. IC4A vartioi, ettei syväpurkausta pääsisi tapahtumaan ja se sammuttaa laitteen kolmivaihevirrän, kun raja saavutetaan. R28 ja D34 huolehtivat hystereesistä siten, että kun raja on saavutettu, laite ei käynnisty ennen akun täyttä latausjännitettä. Tilanne voidaan tietysti kiertää lataamalla akkua jonkin verran ja käynnistämällä laite uudelleen. Täysin varatun akun jännite on 25,44 V. Laitteen käynnistyminen

vaatisi 26,5 V. IC4B ja kytkentä siihen liittyen antaa tiedon siitä, milloin akun varaus-tila on laskenut alle puoleen. Em. rajailmaisimet ovat nopeita ja jännitepiikit voivat johtaa virhepäätöksiin. Jännitteenjakajat R27, P2, R18 ja R22, P3, R21 antavat noin neljänneksen syöttöjännitteestä eli vaihtelualue 25,4 - 23,0 V pienenee 600 mV:iin. Häiriönsietoa voitaisiin lisätä laittamalla kaksi referenssidiodia 1N823 sarjaan, jolloin saataisiin viitejännitteeksi 12,4 V ja vaihtelualue kasvaisi 1,2 V:iin. Tämä edellyttäisi apupiirien jännitteen korottamista esim. 15 V:iin, mikä sujuisi LM7815C:llä ja vastusten uudelleenmitoituksella.

Kondensaattorit C4 ja C5 tuottavat riittävän viiveen, tilanteessa, jossa laitteen kuormitus muuttuu rajusti. Oikosulkumoottori vie käynnistyessään vähintään kolminkertaisen tehon käyttövirtaan nähden ja syöttöjännite voi notkua johtohäviöiden takia. Voisi tulla virhetoiminto. Aikavakio on 5 s ja transistori T6 alkaa johtaa neljännesosasekunnin jälkeen vikatiedon tulosta. Se osoittautui riittävän pitkäksi ajaksi. Vastukset R17 ja R26 purkavat em. kondensaattorit pitkässä juoksussa eli aikavakiolla 56 s.

Kun rele päästää, syntyy jännitepiikki. Käämin yli on asetettava estosuuntainen, nopea diodi, mieluiten Shottky-tyyppiä. Kondensaattorit C1 ja C2 eivät ole välttämättömiä, mutta niitä tulee käyttää, jos jännitepiikkejä kuitenkin ilmenee. Kaikki kolme kannattaa laittaa releen napojen välittömään läheisyyteen. Sulakkeen 2 ei tarvitsi olla 500 mA:ia, mutta silläkin on sisäinen vastus, muuten vastuslanka ei sula vikatilanteessa ja koska virheilmoituksissa on kyse vain sadoista millivolteista, vaikuttaa tuo vastus päätöksentekoon häiritsevästi. Muutoin 200 mA:iakin riittäisi.

Koska Eagle-piirisuunnitteluohjelma suunnittelee johdotuksen piirikaavion pohjalta, on piirrettävä erillinen kytkentäkaavio niille komponenteille, jotka tulevat piirikortille. Jos joku rakentaisi tällaisen laitteen, voin antaa piirikortin kytkentäkaavion ja valmiit valotusmaskit lopulliselle kaksipuoliselle piirikortille. Hyppylankoja tulee 9 kpl.

Mittaustuloksia

Mittalaitteena Agilent U3401A

Laitteen kuormittamaton lepovirta on 1,0 A

"Vaihejännite" akun miinukseen nähden V_{AC}	Kuormittamattomat vaihejännitteet tähtipisteeseen nähden V_{AC}	Virtalähde V_{DC}
12,18 / 12,19 / 12,17	281 / 281 / 280	23,98

Tyhjäkäyntijännite karkaa korkealle! Sääto olisi paikallaan!

Resistiivinen kuormitus hehkulampuilla

3 x 40 W, vastus kylmänä 96,3 Ω / 102 Ω / 96,6 Ω I_{DC} = 5,9 A **hyötysuhde 85 %**

9,68 / 9,74 / 9,74	221 / 230 / 230	23,98
--------------------	-----------------	-------

3 x 75 W, vastus kylmänä 50,5 Ω / 52,4 Ω / 50,8 Ω Akut

9,85 / 9,84 / 9,84	225 / 222 / 216	25,83
--------------------	-----------------	-------

3 x 100 W, vastus kylmänä 39,8 Ω / 39,5 Ω / 39,1 Ω

Akut

9,71 / 9,78 / 9,77

215 / 213 / 205

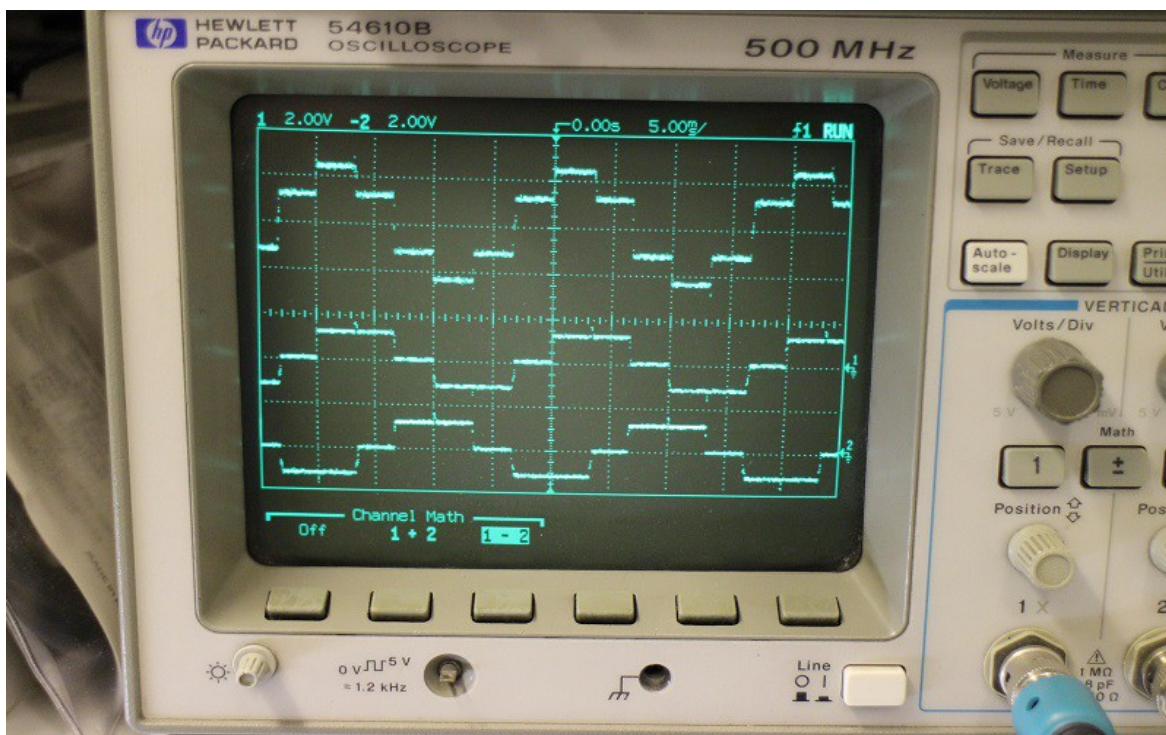
24,40

Kuormana (vesipumppu) oikosulkumoottori tähtikytkentä: kilpi 0,24 A, 230 V, $\cos\phi = 0,48$

Pätöteho $3 \times 0,24 \text{ A} \times 230 \text{ V} \times 0,48 = 80 \text{ W}$ Pumppu tyhjäkäynnillä ilman vettä, virta akuista 2,7 A, mikä merkitsee 66 W:in tehonkulutusta akusta.

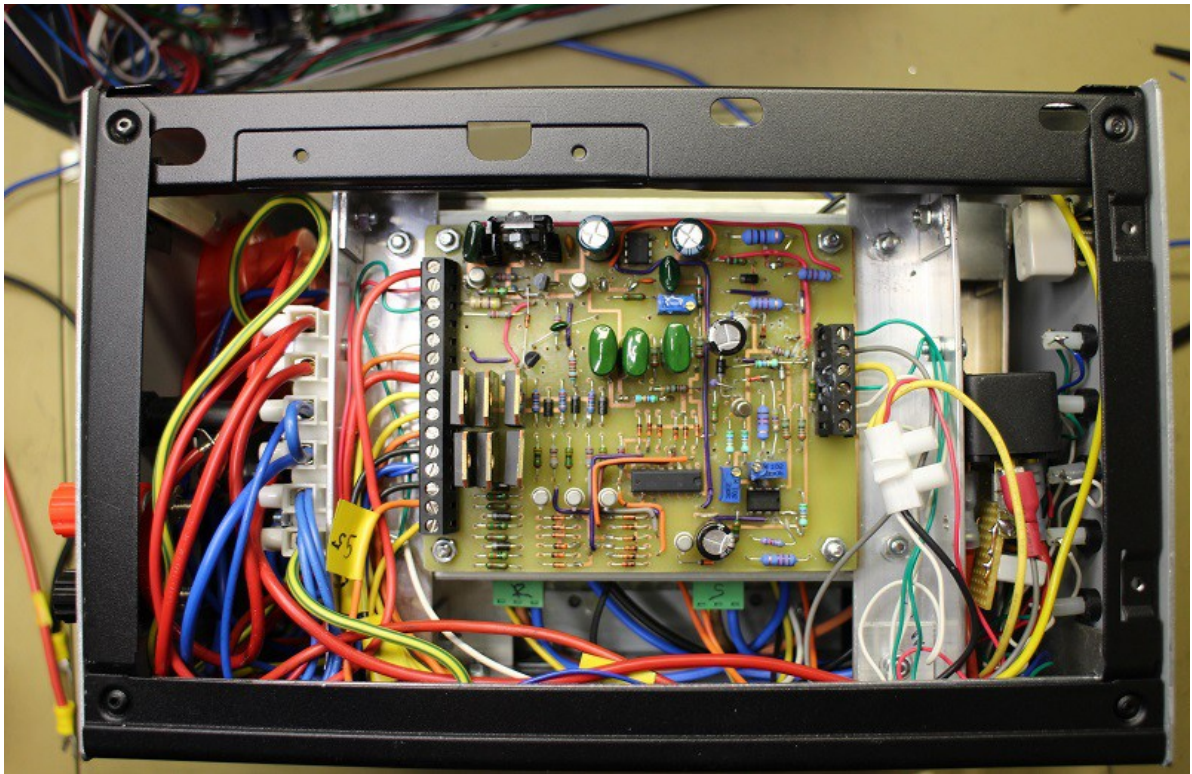


Kolmivaihemuuntaja



The image shows a Hewlett-Packard 54610B 500 MHz Oscilloscope. The screen displays a digital waveform with a grid. The top of the screen shows '1 500mV', '-200mV', '5.00ns/div', and 'f1 RUN'. The bottom of the screen shows '2 On', 'Input 50Ω', 'Coupling AC', 'BW Lim Off', 'Vernier On', and 'Next Menu'. The right side of the oscilloscope has various controls including 'Voltage', 'Time', 'Save/Recall', 'Trace', 'Setup', 'Auto-scale', 'Display', 'VER', 'Volts/Div', 'Position', and a 'Line' button. A blue probe is connected to the input.

Fettisilta



Piirikortti hyppylankoineen ja "ilmajohtoineen." Korjatussa valotusmaskissa on 9 hyppylankaa.



Etulevy



Laite takaa

OH2NFZ, Kari, kari.ilmari.siren@gmail.com 14.03.2023