

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření na transformátoru

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce popisuje transformátor pomocí přepočtených veličin strany sekundární na stranu primární a ověřuje je pomocí měření jalového příkonu transformátoru a přiložených kompenzačních kondenzátorů.

Klíčová slova

Transformátor, magnetický tok, přepočtené veličiny, kompenzační kondenzátory, jalový výkon

Abstract

The submitted Bachelor's thesis describes a transformer using by means of recalculating values the secondary side to the primary side and verifies them by measuring a reactive power of the transformer and connected compensatory capacitors.

Key words

Transformer, magnetic flux, recalculated values, compensatory capacitors, reactive power

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 22.5.2013

Michal Netušil

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
1 TRANSFORMÁTOR.....	11
1.1 PRINCIP TRANSFORMÁTORU.....	11
1.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	12
1.2.1 Převod transformátoru.....	14
1.3 PŘEPOČET VELIČIN NA JEDNOTKOVÝ PŘEVOD.....	15
2 OVĚŘENÍ PŘEPOČTENÝCH VELIČIN MĚŘENÍM.....	17
2.1 MĚŘENÍ JALOVÉHO PŘÍKONU TRANSFORMÁTORU	17
2.2 MĚŘENÍ KOMPENZAČNÍCH KONDENZÁTORŮ	18
2.3 MĚŘENÍ PŘÍKONU TRANSFORMÁTORU S KAPACITAMI	21
ZÁVĚR.....	24
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	25
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce popisuje transformátor pomocí přepočtených veličin strany sekundární na stranu primární a ověřuje je pomocí měření jalového příkonu transformátoru a přiložených kompenzačních kondenzátorů.

Text je rozdělen do dvou částí; první část se zabývá základními principy transformátoru, rovnicemi transformátoru a jeho popis pomocí přepočtených veličin strany sekundární na stranu primární. Druhá část popisuje měření jalového příkonu transformátoru naprázdno a s přiloženými kompenzačními kondenzátory a ověřuje se tak platnost přepočtených veličin.

Seznam symbolů a zkratek

Hlavní značky:

C.....	kapacita [F]
f.....	frekvence [Hz]
I,i.....	elektrický proud [A]
L.....	indukčnost [H]
N.....	počet závitů
P.....	výkon [W]
p.....	převod transformátoru
Q.....	jalový výkon [var]
R.....	činný odpor [Ω]
t.....	čas [s]
U,u.....	elektrické napětí [V]
X.....	reaktance [Ω]
Z.....	impedance [Ω]
Φ	magnetický tok [Wb]
ω	úhlová rychlost [rad/s]
ψ	spřažený magnetický tok
MATLAB.....	Matrix laboratoř

Indexy:

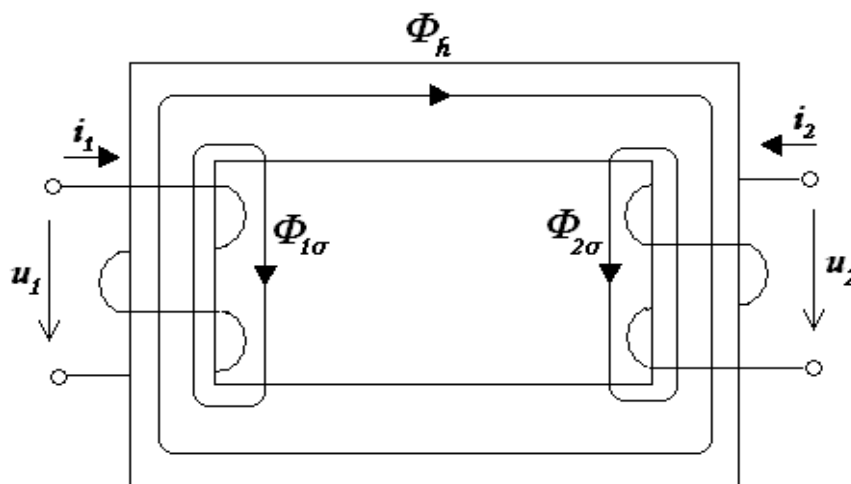
1,2,12.....	primár, sekundár, vzájemný
c.....	kapacitní
D.....	spojení do trojúhelníka
f.....	fázový
fe.....	železo
i.....	indukovaný
j.....	jalový
h.....	hlavní

- 0naprázdno
- ssdružený
- Yspojení do hvězdy
- σ rozptylový
- μ magnetizační
- 'přepočtený

1 Transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj, který transformuje elektrickou energii. Transformuje tedy napětí a proud při stejné frekvenci, přičemž výkon zůstává stejný. Transformátory se používají v řadě elektrotechnických zařízení, počínaje napájecími transformátorky sdělovacích a polovodičových zařízení až po blokové či přenosové transformátory používané v energetice. Výkony těchto transformátorů se pohybují od jednotek VA až po stovky MVA. Transformátory se mohou vyrábět buď jako jednofázové nebo vícefázové a to převážně třífázové.[3]

1.1 Princip transformátoru



Obr. 1-1 Principiální uspořádání transformátoru

Princip transformátoru vychází ze zákona elektromagnetické indukce. Na Obr. 1-1 je zobrazen magnetický obvod, na kterém jsou navinuty primární a sekundární vinutí transformátoru. Na primární straně transformátoru je připojeno střídavé napětí s okamžitou hodnotou u_1 . Toto střídavé napětí protlačí vinutím proud i_1 , který vybudí v magnetickém obvodu magnetický tok Φ o stejné frekvenci jako má napětí u_1 . Magnetický tok se uzavírá magnetickým obvodem, který tvoří transformátorové plechy. Časová změna magnetického toku vyvolá v primárním vinutí indukované napětí u_{i1} , pro které platí vztah

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d\psi_1}{dt} \quad 1.1-1$$

Stejná změna magnetického toku působí také na závity sekundárního vinutí, ve kterém se indukuje napětí u_{i2}

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt} \quad 1.1-2$$

Pro magnetické toky platí

$$\Phi_{1(t)} = \Phi_{h(t)} + \Phi_{1\sigma(t)} \quad 1.1-3$$

$$\Phi_{2(t)} = \Phi_{h(t)} + \Phi_{2\sigma(t)} \quad 1.1-4$$

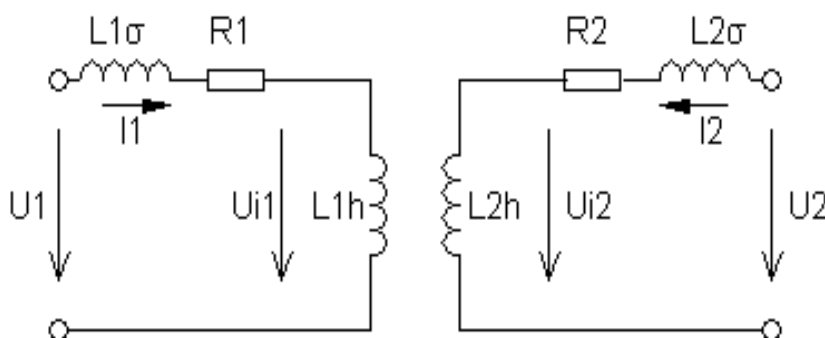
Je-li na sekundární vinutí transformátoru připojena zatěžovací impedance Z , pak sekundárním vinutím transformátoru bude procházet proud

$$i_2 = \frac{u_{i2}}{Z} \quad 1.1-5$$

Orientace sekundárního proudu je dle Lencova pravidla orientovaná tak, aby tímto proudem vybuzený magnetický tok působil proti magnetickému toku, který jej vyvolal. [2]

1.2 Náhradní schéma transformátoru

Vycházíme z principiálního uspořádání transformátoru *Obr. 1-1*. To jsou ve skutečnosti dva magneticky vázané obvody *Obr. 1-2*.



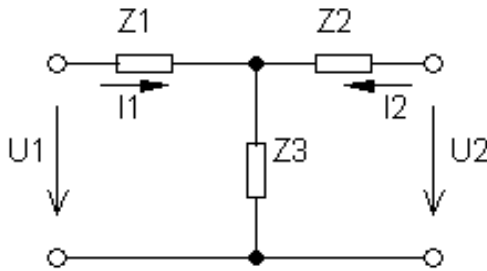
Obr. 1-2 Obvodové znázornění transformátoru

Pro *Obr. 1-2* lze psát rovnice, pro které použijeme symbolicko-komplexní metodu.

$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_1)\mathbf{I}_1 + jX_{12}\mathbf{I}_2 \quad 1.2-1$$

$$\mathbf{U}_2 = (R_2 + jX_2)\mathbf{I}_2 + jX_{12}\mathbf{I}_1 \quad 1.2-2$$

Abychom mohli přejít na jeden obvod znázorňující náhradní schéma transformátoru, využijeme obecný dvojbran typu T-článek, který je zobrazen na.



Obr. 1-3 Obecný dvojbran pro náhradní schéma transformátoru

Pro tento dvojbran platí rovnice

$$U_1 = (Z_1 + Z_3)I_1 + Z_3I_2 \quad 1.2-3$$

$$U_2 = (Z_2 + Z_3)I_2 + Z_3I_1 \quad 1.2-4$$

Porovnáme-li rovnice 1.2-1 a 1.2-2 s rovnicemi 1.2-3 a 1.2-4, tak můžeme určit neznámé Z_1 , Z_2 a Z_3 a také tyto rovnice budou platit pro transformátor s následující volbou parametrů.

$$Z_1 = R_1 + j(X_1 - X_{12})$$

$$Z_2 = R_2 + j(X_2 - X_{12})$$

$$Z_3 = jX_{12}$$

Pro rovnice transformátoru tedy platí

$$U_1 = (R_1 + j(X_1 - X_{12}))I_1 + jX_{12}I_2 \quad 1.2-5$$

$$U_2 = (R_2 + j(X_2 - X_{12}))I_2 + jX_{12}I_1 \quad 1.2-6$$

Nyní můžeme kreslit náhradní schéma transformátoru, jako dvojbran typu T-článek

. Zároveň využijeme vztahy mezi magnetickými toky, indukčnostmi a reaktancemi. Tyto vztahy získáme z definice vlastní indukčnosti cívky, $L = \frac{\Phi}{I}$ a pro reaktanci platí $X = \omega L$. To znamená, že $L, X \sim \Phi$ a tedy $X_1 \sim \Phi_1$, $X_2 \sim \Phi_2$ a $X_{12} \sim \Phi_h$. Pak tedy platí

$$X_1 - X_{12} \sim \Phi_1 - \Phi_{1h} = \Phi_{1\sigma} \quad 1.2-7$$

$$X_2 - X_{12} \sim \Phi_2 - \Phi_{2h} = \Phi_{2\sigma} \quad 1.2-8$$

Na základě podobnosti reaktance a rozptylového toku z rovnic 1.2-7 a 1.2-8 můžeme definovat rozptylovou reaktanci

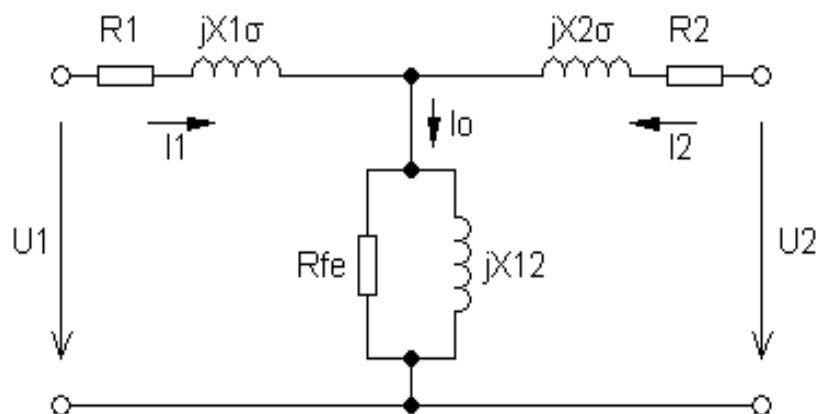
$$X_1 - X_{12} = X_{1\sigma} \quad 1.2-9$$

$$X_2 - X_{12} = X_{2\sigma} \quad 1.2-10$$

Do příčné větve byl ještě přidán činný odpor R_{fe} , který charakterizuje ztráty v magnetickém obvodu transformátoru. Mezi tyto ztráty patří ztráty hysterezní a vířivými proudy. Tyto ztráty představují energeticky nevyužitý činný výkon, který se v magnetickém obvodu a z části i v elektrickém obvodu transformátoru mění v tepelnou energii. Velikost ztrát závisí na velikosti magnetického toku Φ . Ztráty lze zmenšit:

- Volbou vhodného materiálu s malými měrnými ztrátami
- Volbou optimálního tvaru magnetického obvodu
- Vhodným způsobem skládání magnetického obvodu

Velikost ztrát naprázdno je mírou hospodárnosti transformátorů a kritériem jejich kvality.



Obr. 1-4 Náhradní schéma transformátoru

Takto znázorněné schéma transformátoru *Obr. 1-4* platí pouze pro převod $p = 1$. Pro převod $p > 1$ se objevuje na reaktanci X_{12} rozdílné indukované napětí, $U_{i1} > U_{i2}$. Na základě skutečnosti, že $U_m = NI = R_m \Phi$ a dosazením za Φ z vlastní indukčnosti $\Phi = \frac{LI}{N}$, lze psát

$$X_1 \sim N_1^2, X_2 \sim N_2^2, X_{12} \sim N_1 N_2 \quad 1.2-11$$

Pak můžeme psát pro podélnou větev, za předpokladu $p > 1$

$$X_1 - X_{12} \sim N_1^2 - N_1 N_2 = N_1(N_1 - N_2) > 0 \quad 1.2-12$$

$$X_2 - X_{12} \sim N_2^2 - N_1 N_2 = N_2(N_2 - N_1) < 0 \quad 1.2-13$$

Z rovnice 1.2-13 je vidět, že rozdíl reaktancí v podélné větvi je záporné imaginární číslo, což znamená že, v náhradním schématu dle *Obr. 1-4*, má reaktanční složka kapacitní charakter. Je proto nutné náhradní schéma transformátoru *Obr. 1-4* vhodně upravit. Úprava spočívá v přepočtu sekundárních nebo primárních veličin na jednotkový převod. Tím se odstraní různá velikost indukovaných napětí, které vznikly na příčné větvi transformátoru a kapacitní charakter reaktanční složky v podélné větvi.[1]

1.2.1 Převod transformátoru

Převodem transformátoru se rozumí poměr indukovaných napětí v primárním a sekundárním vinutí. Za předpokladu ideálního transformátoru, tedy při zanedbání vnitřních odporů a rozptylových magnetických toků transformátoru a využití II. Kirchhoffova zákona, lze převod definovat jako poměr svorkových napětí primární a sekundární strany transformátoru. Platí tedy

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{U_1}{U_2} \quad 1.2-14$$

Pro indukované napětí lze psát $U_1 = 4,44f\Phi N_1$. Po dosazení do rovnice 1.2-11 dostáváme, že převod se dá vyjádřit jako poměr závitů primární a sekundární strany transformátoru.

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44f\Phi N_1}{4,44f\Phi N_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 1.2-15$$

Převod můžeme také vyjádřit pomocí proudů primárního a sekundárního vinutí. Vycházíme z rovnosti příkonů.

$$P_1 = P_2 \quad 1.2-16$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad 1.2-17$$

Pro převod tedy platí

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad 1.2-18$$

Napětí jsou úměrná počtu závitů a nepřímo úměrná proudům.[3]

1.3 Přepočítání veličin na jednotkový převod

Z výše uvedených důvodů je potřeba udělat přepočítání na jednotkový převod. Využijeme přepočítání strany sekundární na stranu primární. Nejprve zavedeme přepočtené veličiny

$$U'_2 = pU_2, \quad I'_2 = \frac{I_2}{p}, \quad Z'_2 = \frac{U'_2}{I'_2} = p^2 Z_2 \quad 1.3-1$$

Dále je třeba přepočítat vzájemnou reaktanci X_{12} , pro kterou platí

$$X_{12} = \kappa \sqrt{X_{1h} X_{2h}} = \sqrt{X_{1h} X_{2h}} \quad 1.3-2$$

Potom pro převedenou reaktanci X'_{12} lze psát

$$X'_{12} = \sqrt{X_{1h} X'_{2h}}, \quad X'_{2h} = pX_{2h} \quad 1.3-3$$

Jelikož reaktance X'_{2h} byla přepočítána na jednotkový převod, pak též musí platit

$$X'_{2h} = X_{1h} \quad 1.3-4$$

$$X'_{12} = \sqrt{X_{1h}^2} = X_{1h} \quad 1.3-5$$

Nyní je možno vhodně upravit rovnice transformátoru 1.2-1 a 1.2-2. V první rovnici 1.2-1 je potřeba upravit druhou část, proto bude vynásobena $\frac{p}{p}$. Podobnou úpravu uděláme i ve druhé rovnici 1.2-2, kde vynásobíme levou stranu rovnice 1.2-2 $\frac{p}{p}$ a to samé uděláme v této rovnici pro první část pravé strany. Po drobných úpravách dostáváme

$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_1)\mathbf{I}_1 + j\sqrt{X_{1h} * p^2 X_{2h}} \frac{\mathbf{I}_2}{p} \quad 1.3-6$$

$$p\mathbf{U}_2 = (R_2 p^2 + jX_2 p^2) \frac{\mathbf{I}_2}{p} + j\sqrt{X_{1h} * p^2 X_{2h}} * \mathbf{I}_1 \quad 1.3-7$$

Nyní využijeme výše definované přepočtené veličiny rovnice 1.3-1. Dále porovnáme nové rovnice transformátoru 1.3-6 a 1.3-7 s rovnicemi dvojhranu typu T-článek 1.2-3 a 1.2-4.

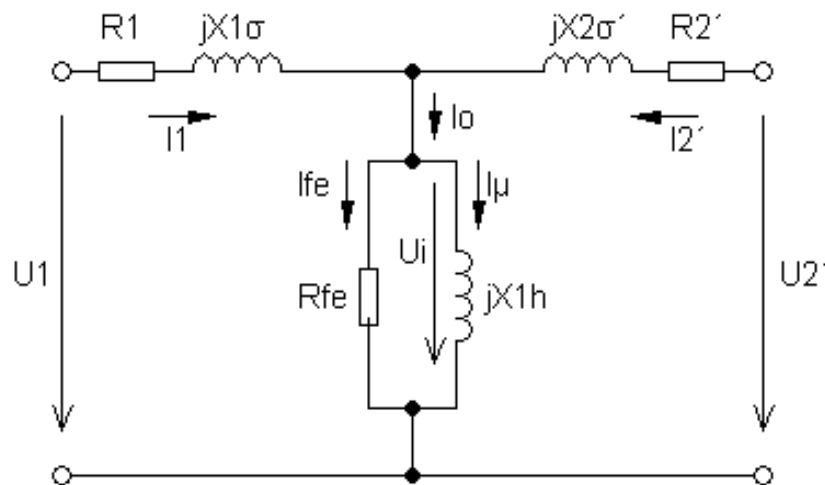
$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_1 - jX_{1h})\mathbf{I}_1 + jX_{1h}\mathbf{I}'_2 \quad 1.3-8$$

$$\mathbf{U}'_2 = (R'_2 + jX'_2 - jX_{1h})\mathbf{I}'_2 + jX_{1h}\mathbf{I}_1 \quad 1.3-9$$

Uvedené přepočtené veličiny dodržují rovnost výkonů transformátoru

$$U_2 I'_2 = U_2 p \frac{I_2}{p} = U_2 I_2 \quad 1.3-10$$

Též je odstraněna nesrovnalost v podélné větvi, jelikož $X_1 > X_{1h}$, $X'_2 > X_{1h}$. Pak výsledné náhradní schéma transformátoru respektující $p > 1$ je na *Obr. 1-5*.



Obr. 1-5 Korigované náhradní schéma transformátor

Místo rozdílu reaktancí v podélné větvi náhradního schématu transformátoru jsou zavedeny rozptylové reaktance. Též je v příčné větvi přidán odpor R_{fe} , který respektuje ztráty v železe. Příčnou větví tedy teče proud magnetizační I_μ vytvářející hlavní tok a I_{fe} reprezentující ztráty v železe. Pro proudy v příčné větvi tedy platí

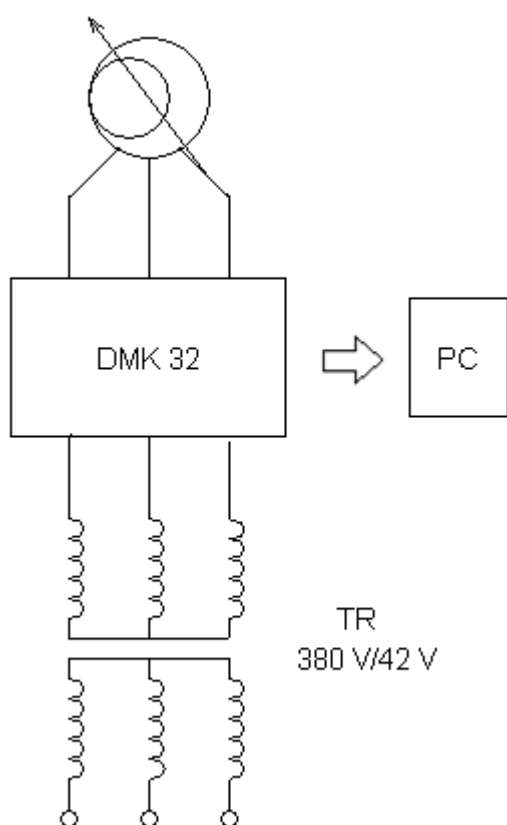
$$I_1 + I'_2 = I_0 \quad , \quad I_0 = I_{fe} + I_\mu$$

2 Ověření přepočtených veličin měřením

Ověření přepočtených veličin spočívá v porovnání odebíraného jalového příkonu transformátoru při chodu naprázdno a s připojenými kompenzačními kondenzátory na primární a sekundární straně transformátoru. V případě platnosti přepočtených veličin by měl být odebíraný jalový výkon transformátoru stejný, pokud budou kompenzační kondenzátory připojené na primární straně p^2 krát větší než kompenzační kondenzátory připojené na sekundární straně transformátoru.

2.1 Měření jalového příkonu transformátoru

Cílem tohoto měření je zjistit jalový příkon transformátoru, pro zjištění vhodných velikostí kompenzačních kondenzátorů. Při tomto měření je transformátor nezátížen, čili naprázdno. Při měření transformátoru naprázdno jsou svorky sekundárního vinutí rozpojeny. Na svorky primárního vinutí transformátoru je přivedeno střídavé napětí v rozmezí 30V až 380V, což je vstupní jmenovité napětí transformátoru. Mezi zdroj střídavého napětí a vstupní svorky transformátoru je připojeno měřicí zařízení DMK 32, který měří jalový příkon odebíraný

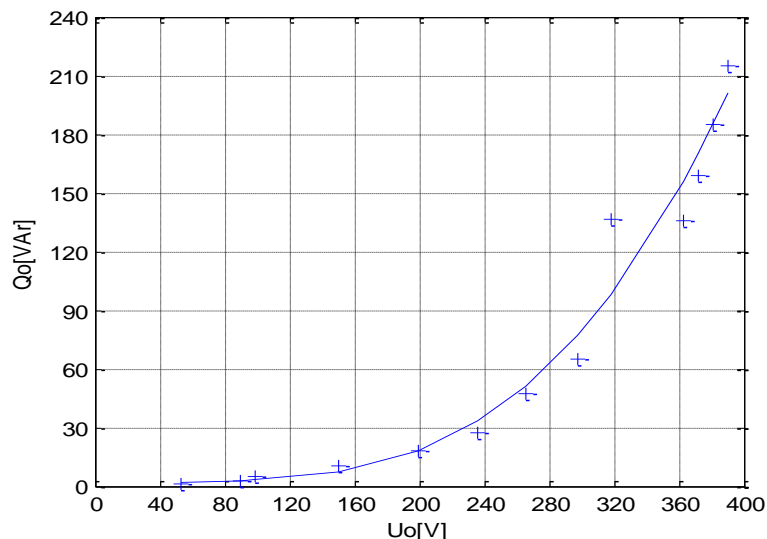


Obr. 2-1 Schéma zapojení pro měření TR naprázdno

transformátorem. Schéma zapojení měření transformátoru naprázdno je na Obr. 2-1. Odebíraný jalový příkon transformátoru v závislosti na napětí je na Obr. 2-2. Z grafu na Obr. 2-2 lze odečíst, že odebíraný jalový příkon transformátoru pro 380 V je zhruba 185 varů.

Štítek transformátoru:

Typ spojení	Yny0
Evidenční číslo	TUU 324 05
Vstupní napětí	3x380V/220V
Výstupní napětí	3x42V
Vstupní proud	9,87A
Výstupní proud	87A



Obr. 2-2 Jalový příkon TR naprázdno

2.2 Měření kompenzačních kondenzátorů

Cílem tohoto měření bylo změřit jalový výkon vhodně zvolených kompenzačních kondenzátorů. Výše měřený transformátor měl převod $p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{42} = 9,04$. K ověření platnosti přepočtených veličin je tedy potřeba zvolit kompenzační kondenzátory v poměru převodu transformátoru na druhou, jelikož platí

$$Z_1 = Z_2 = \frac{U_2'}{I_2'} = \frac{U_2 p}{\frac{I_2}{p}} = p^2 Z_2 \quad 2.2-1$$

Rovnice 2.2-1 platí jak pro impedanci tak reaktanci, pak tedy pro kapacity platí

$$\begin{aligned} X_1 &= p^2 X_2 \\ \frac{1}{\omega C_1} &= p^2 \frac{1}{\omega C_2} \\ C_2 &= p^2 C_1 \end{aligned} \quad 2.2-2$$

Dalším kritériem pro výběr kompenzačních kondenzátorů byl dodávaný jalový výkon, ten by měl být tak velký, aby viditelně ovlivnil odebíraný jalový příkon transformátoru. Dodávaný jalový výkon kompenzačních kondenzátorů závisí na tom, zda jsou kondenzátory spojené do hvězdy nebo do trojúhelníka.

Odvození jalového výkonu jednotlivých zapojení:

1) Samostatný kondenzátor:

$$X_c = -\frac{1}{\omega C} \quad 2.2-3$$

$$I_c = \frac{U_c}{X_c} = U_c \omega C \quad 2.2-4$$

$$Q = U_c I_c = U_c^2 \omega C \quad 2.2-5$$

2) Kondenzátory spojené do hvězdy:

Každý kondenzátor je připojen na fázové napětí.

$$Q_Y = 3U_f I_c = 3U_f^2 \omega C = 3\left(\frac{U_f}{\sqrt{3}}\right)^2 \omega C = U_s^2 \omega C \quad 2.2-6$$

3) Kondenzátory spojené do trojúhelníka:

Každý kondenzátor je připojen na sdružené napětí.

$$Q_D = 3U_s I_c = 3U_s^2 \omega C \quad 2.2-7$$

Dle těchto kritérií byly zvoleny kompenzační kondenzátory o kapacitě 3x250μF a 3x4μF. Dosazením těchto kapacit do rovnice 2.2-6 zjistíme, že jalový výkon dodaný kompenzačními kondenzátory 3x4μF spojených do hvězdy je:

$$Q_{Y-4\mu F} = U_s^2 \omega C = 380^2 * 2\pi f * 4 * 10^{-6} = 181 \text{ var} \quad 2.2-8$$

Jalový výkon dodávaný kompenzačními kondenzátory 3x250μF spojených do hvězdy je:

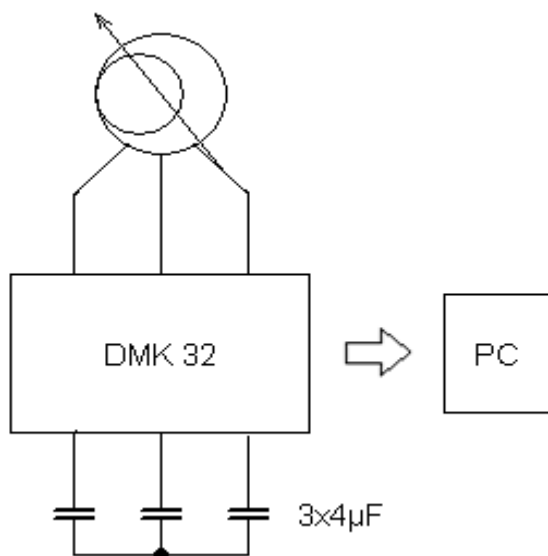
$$Q_{Y-250\mu F} = U_s^2 \omega C = 42^2 * 2\pi f * 250 * 10^{-6} = 139 \text{ var} \quad 2.2-9$$

Dodávaný jalový výkon kompenzačních kondenzátorů 3x4μF a 3x250μF není stejný, ale liší se o 42 varů. Rozdíl jalových výkonů je dán tím, že poměr kapacit 3x4μF a 3x250μF není přesně v poměru převodu transformátoru na druhou, jak bylo odvozeno v rovnici 2.2-2. Nic méně tyto velikosti kompenzačních kondenzátorů pro určení platnosti přepočtených veličin transformátoru postačují. V ideálním případě by byly zapotřebí kompenzační kondenzátory o kapacitě 3x250μF a 3x3,1μF spojených do hvězdy nebo o kapacitě 3x4μF a 3x327μF spojených do hvězdy. Jalový výkon by pak byl:

$$Q_{Y-3,1\mu F} = U_s^2 \omega C = 380^2 * 2\pi f * 3,1 * 10^{-6} = 140 \text{ var} \quad 2.2-10$$

$$Q_{Y-327\mu F} = U_s^2 \omega C = 42^2 * 2\pi f * 327 * 10^{-6} = 181 \text{ var} \quad 2.2-11$$

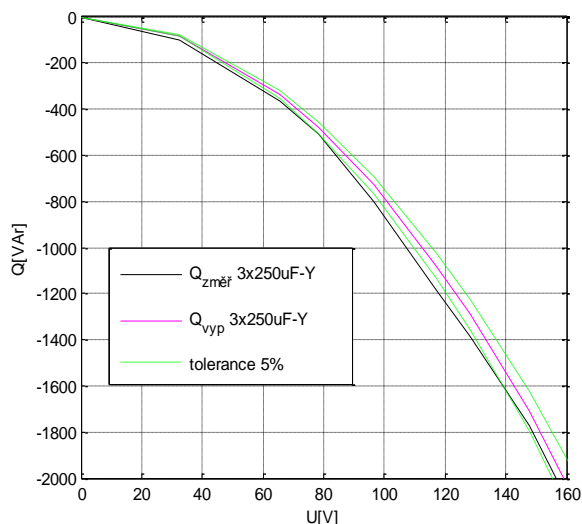
Z rovnic 2.2-8 a 2.2-11 je dokázáno, že jalové výkony kompenzačních kondenzátorů jsou stejné, jelikož jsou přesně v poměru převodu transformátoru na druhou. To samé platí pro



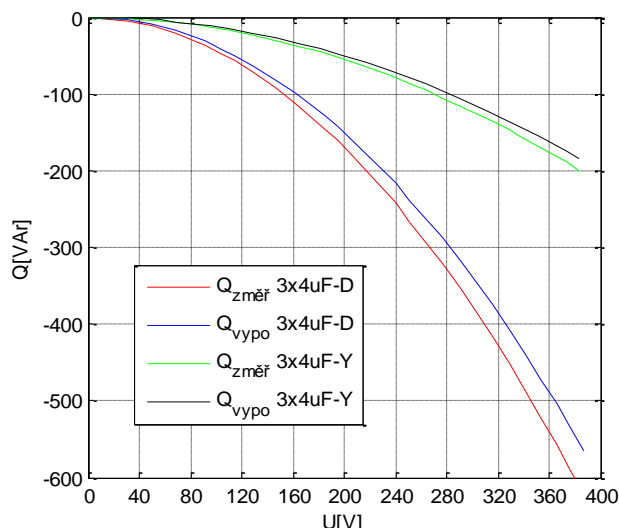
Obr. 2-3 Schéma zapojení pro měření jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$

rovnice 2.2-9 a 2.2-10, kde dodávaný jalový výkon kompenzačních kondenzátorů je stejný. Pro zjištění skutečného dodávaného jalového výkonu byly kompenzační kondenzátory připojeny přes DMK 32 ke zdroji proměnného střídavého napětí. Schéma zapojení pro měření jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy je na Obr. 2-3. Schéma zapojení na Obr. 2-3, platí i pro měření jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 250 \mu\text{F}$, které byly také spojeny do hvězdy. Byl změřen také dodávaný jalový výkon

kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do trojúhelníka. Schéma zapojení je uvedeno v příloze. Změřený jalový výkon kompenzačních kondenzátorů do trojúhelníka by měl být dle rovnice 2.2-7 třikrát větší, než při spojení kompenzačních kondenzátorů do hvězdy. Na Obr. 2-5 je zobrazen dodávaný jalový výkon kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ v závislosti na napájecím napětí.



Obr. 2-5 Dodávaný jalový výkon kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$

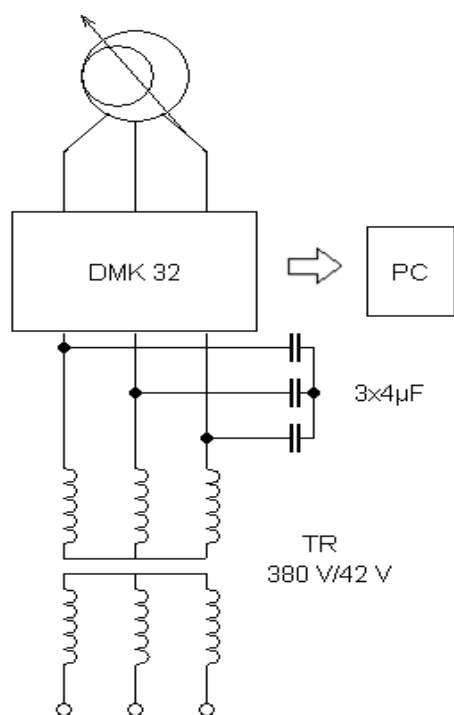


Obr. 2-4 Dodávaný jalový výkon kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$

Křivka změřeného jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 250 \mu\text{F}$ je téměř shodná s křivkou jalového výkonu spočítaného pomocí Matlabu dle rovnice 2.2-6 uvedenou výše. Rozdíl mezi oběma křivkami je dán tím, že skutečná kapacita kompenzačních kondenzátorů byla o něco větší než $250 \mu\text{F}$, se kterými počítal Matlab. Kompenzační kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$

by měli být připojeny na sekundární stranu transformátoru, proto je důležitá hodnota jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 250 \mu\text{F}$ při 42V. Na Obr. 2-5 je vidět, že jalový výkon kompenzačních kondenzátorů $3 \times 250 \mu\text{F}$ při 42V je zhruba -180 varů. Na Obr. 2-4 je zobrazen jalový výkon kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy nebo do trojúhelníka v závislosti na napájecím napětí. Z Obr. 2-4 je vidět, že rozdíl mezi změřeným a vypočítaným (pomocí Matlabu) jalovým výkonem kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy nebo do trojúhelníka je nepatrný. Tento rozdíl je opět dán tím, že skutečná kapacita kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ byla o něco větší. Kompenzační kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ budou připojeny na primární stranu transformátoru, proto je důležitá hodnota jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy při 380V. Z Obr. 2-4 je vidět, že jalový výkon kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy je -200 varů. Z Obr. 2-4 je též vidět rozdíl dodávaného jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ při spojení do hvězdy a do trojúhelníka. Při spojení do hvězdy a při 380 V je dodávaný jalový výkon -200 varů a při spojení do trojúhelníka a při 380V je dodávaný jalový výkon -600 varů. Je tedy patrné, že při spojení kompenzačních kondenzátorů do hvězdy je dodávaný jalový výkon o třetinu menší, než při spojení do trojúhelníka. Tato skutečnost odpovídá výše definovaným vztahům 2.2-6 a 2.2-7.

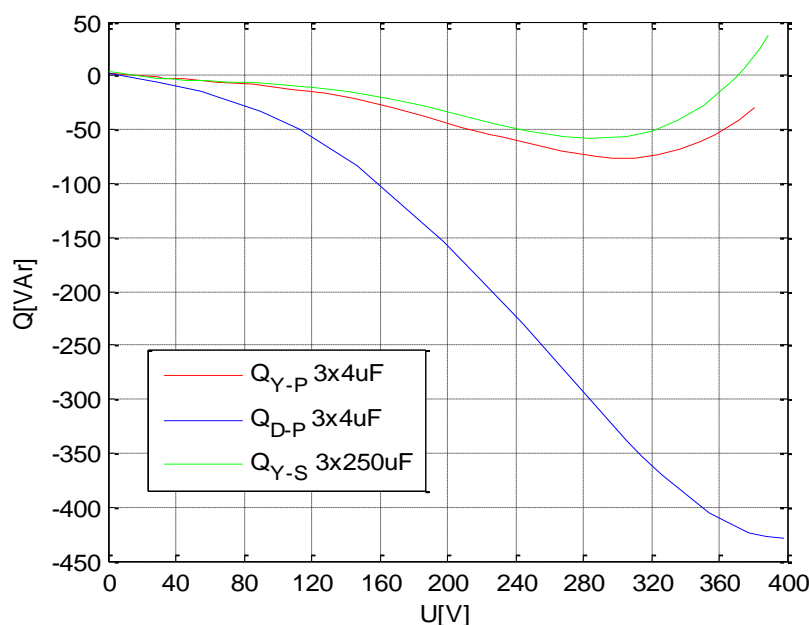
2.3 Měření příkonu transformátoru s kapacitami



Obr. 2-6 Schéma zapojení měření příkonu TR s připojenými kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$

Cílem tohoto měření bylo změřit jalový příkon transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory na primární a následně na sekundární straně transformátoru a porovnat, zda je jalový příkon transformátoru stejný či nikoliv. Nejprve byly připojeny kompenzační kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojené do hvězdy paralelně na primární svorky transformátoru a přes měřicí zařízení DMK 32 ke zdroji střídavého napětí. Sekundární svorky transformátoru byly rozpojené. Schéma tohoto zapojení je na Obr. 2-6. Na primární straně transformátoru se zvyšovalo napětí z 30V až na 380V a k tomu se odečítala příslušná hodnota jalového příkonu transformátoru. Dále byl změřen jalový příkon

transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do trojúhelníka na primární straně transformátoru. Schéma zapojení s kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do trojúhelníka je uvedeno v příloze. Odebíraný jalový příkon transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy a do trojúhelníka na primární straně transformátoru je na *Obr. 2-7*. Poté bylo provedeno další měření, kdy na sekundární svorky transformátoru byly připojeny kompenzační kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ spojené do hvězdy a primární svorky transformátoru byli připojeny přes měřicí zařízení DMK 32 ke zdroji střídavého napětí. Schéma zapojení s kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy na sekundární straně transformátoru je uvedeno v příloze. Opět bylo zvyšováno napětí na primární straně transformátoru z 30V až na 380V a k tomu se odečítala příslušná hodnota jalového příkonu transformátoru. Odebíraný jalový příkon transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy na sekundární straně transformátoru je na *Obr. 2-7*.



Obr. 2-7 Jalový příkon Transformátoru s kompenzačními kondenzátory

Z *Obr. 2-7* je vidět, že jalový příkon transformátoru je skoro stejný ať už jsou připojeny kompenzační kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ na primární straně transformátoru nebo kompenzační kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ na sekundární straně transformátoru. Jalový příkon transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy při napětí 380V je -29 varů a jalový příkon transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ při napětí 380V je 20 varů. Rozdíl mezi příkony transformátoru je tedy 49 varů. Dle přepočtených veličin by rozdíl mezi příkony transformátoru s připojenými kompenzačními

kondenzátory na primární a sekundární straně transformátoru měl být nulový. To ovšem platí za předpokladu, že kapacity budou v poměru převodu transformátoru na druhou dle rovnice 2.2-2, což tyto kompenzační kondenzátory nebyly. Z předchozího měření ale víme, že rozdíl mezi dodávaným jalovým výkonem kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy a kompenzačních kondenzátorů $3 \times 250 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy je 20 varů. Díky tomu se dá tvrdit, že jalový příkon transformátoru je stejný, ať už jsou kompenzační kondenzátory připojeny na primární nebo sekundární straně. To znamená, že platí přepočtené veličiny transformátoru a tím i rovnice transformátoru 1.3-8 a 1.3-9.

Závěr

Základní princip transformátoru byl naznačen v kapitole 1. Jsou zde odvozeny rovnice transformátoru (1.2-5 a 1.2-6) a náhradní schéma transformátoru pro $p = 1$ (Obr. 1-4). V odstavci 1.3 je odvozena korekce rovnic transformátoru a náhradní schéma transformátoru pro $p > 1$ pomocí přepočtených veličin strany sekundární na stranu primární.

Kapitola 2 je zaměřena na ověření platnosti přepočtených veličin pomocí měření jalového příkonu transformátoru. Nejprve byl změřen jalový příkon samotného transformátoru (odstavec 2.1) a na základě tohoto měření byly zvoleny kompenzační kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ a $3 \times 250 \mu\text{F}$. Pro tyto hodnoty kondenzátorů, byl proveden teoretický výpočet dodávaného jalového výkonu (rovnice 2.2-8 a rovnice 2.2-9). Dle teoretického výpočtu se hodnoty jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu\text{F}$ a $3 \times 250 \mu\text{F}$ liší o 42 varů. Poté na těchto kompenzačních kondenzátorech bylo provedeno měření zda-li budou dodávat stejný jalový výkon při připojení na 380V respektive na 42V, což graf na Obr. 2-4 a Obr. 2-5 potvrzuje. Změřené hodnoty se liší o 20 varů, což způsobily kompenzační kondenzátory, které nebyly úplně přesně v poměru převodu transformátoru na druhou, jak bylo odvozeno v rovnici 2.2-2. Změřené hodnoty jalového výkonu v závislosti na napětí byly ověřeny výpočtem v prostředí výpočtového softwaru MATLAB.

V odstavci 2.3 došlo k porovnání jalového příkonu transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy na primární straně transformátoru a kompenzačními kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ spojených do hvězdy na sekundární straně transformátoru. Z grafu na Obr. 2-7 je možné vidět rozdíl 49 varů mezi příkony transformátoru s připojenými kompenzačními kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ a $3 \times 250 \mu\text{F}$. Rozdíl je způsoben kompenzačními kondenzátory, které nebyly v přesném poměru a odchylka odpovídá teoretickému výpočtu jalového výkonu (rovnice 2.2-8 a rovnice 2.2-9). Z toho lze tvrdit, že jalový příkon transformátoru je stejný, ať už jsou připojeny kompenzační kondenzátory $3 \times 4 \mu\text{F}$ na primární stranu transformátoru nebo kompenzační kondenzátory $3 \times 250 \mu\text{F}$ na sekundární stranu transformátoru a platí tedy přepočtené veličiny transformátoru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-509-7.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2.vydání. v Plzni: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-332-9.
- [3] KOČMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEK. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [4] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.

Přílohy

Příloha A – tabulka 1 – měření TR naprázdno

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
30	30	98	52,67	2	1	2	1
60	60	150	90,00	6	3	4	2,6
99	99	98	98,67	12	6	8	5,2
151	150	150	150,33	25	11	15	10,2
200	199	198	199,00	40	20	30	18
237	236	236	236,33	60	30	47	27,4
267	265	265	265,67	98	52	85	47
299	298	297	298,00	133	73	118	64,8
320	319	317	318,67	268	164	251	136,6
364	363	361	362,67	266	164	249	135,8
373	372	370	371,67	307	194	292	158,6
382	382	379	381,00	355	230	341	185,2
391	391	388	390,00	409	270	397	215,2

Příloha B – tabulka 2 – měření TR s kompenzačními kondenzátory 3x4 μ F do hvězdy

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0
29	29	30	29,33	-1	-2	-2	-1
33	32	33	32,67	-2	-2	-2	-1,2
45	45	45	45,00	-3	-4	-4	-2,2
65	64	65	64,67	-6	-8	-8	-4,4
86	85	86	85,67	-11	-14	-14	-7,8
109	108	109	108,67	-19	-23	-23	-13
119	118	119	118,67	-22	-28	-28	-15,6
128	127	129	128,00	-26	-33	-32	-18,2
145	145	146	145,33	-33	-42	-41	-23,2
168	166	168	167,33	-44	-56	-53	-30,6
188	187	188	187,67	-55	-71	-67	-38,6
209	208	209	208,67	-67	-86	-81	-46,8
225	224	228	225,67	-78	-103	-96	-55,4
231	230	232	231,00	-80	-104	-97	-56,2
268	267	268	267,67	-94	-133	-115	-68,4
288	287	288	287,67	-96	-148	-120	-72,8
298	297	298	297,67	-96	-157	-123	-75,2
311	310	310	310,33	-93	-163	-119	-75
325	323	324	324,00	-84	-168	-115	-73,4
337	336	336	336,33	-76	-171	-107	-70,8
350	348	348	348,67	-66	-166	-97	-65,8
359	357	358	358,00	-60	-162	-86	-61,6
373	371	371	371,67	66	-156	-82	-34,4
382	379	380	380,33	83	-147	-83	-29,4

Příloha C – tabulka 3 – měření TR s kompenzačními kondenzátory 3x4 μ F do trojúhelníka

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0
30	29	30	29,67	-6	-7	-7	-4
54	55	56	55,00	-21	-22	-23	-13,2
64	64	64	64,00	-26	-28	-29	-16,6
90	90	91	90,33	-51	-56	-57	-32,8
104	103	104	103,67	-75	-82	-86	-48,6
113	112	113	112,67	-78	-85	-88	-50,2
147	146	147	146,67	-132	-144	-148	-84,8
147	146	147	146,67	-133	-144	-148	-85
198	198	198	198,00	-238	-261	-268	-153,4
218	217	218	217,67	-285	-316	-321	-184,4
244	243	244	243,67	-351	-393	-397	-228,2
269	269	269	269,00	-417	-473	-471	-272,2
306	305	305	305,33	-510	-596	-579	-337
316	315	315	315,33	-541	-639	-619	-359,8
326	326	326	326,00	-557	-662	-629	-369,6
354	353	354	353,67	-602	-741	-689	-406,4
378	376	377	377,00	-616	-790	-708	-422,8
389	386	387	387,33	-611	-805	-711	-425,4
399	397	398	398,00	-607	-824	-717	-429,6

Příloha D – tabulka 4 – měření TR s kompenzačními kondenzátory 3x250 μ F do hvězdy

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Usek	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	29	30	29,33	3,24	-1	-1	-1	-0,60
37	36	37	36,67	4,06	-1	-2	-2	-1,00
45	45	46	45,33	5,01	-2	-3	-3	-1,60
57	57	58	57,33	6,34	-3	-5	-5	-2,60
72	71	72	71,67	7,93	-6	-8	-7	-4,20
84	83	84	83,67	9,26	-8	-11	-11	-6,00
98	97	98	97,67	10,80	-11	-15	-14	-8,00
109	109	110	109,33	12,09	-14	-19	-19	-10,40
122	122	123	122,33	13,53	-18	-23	-23	-12,80
141	141	142	141,33	15,63	-24	-32	-31	-17,40
166	165	166	165,67	18,33	-33	-44	-43	-24,00
187	185	187	186,33	20,61	-42	-55	-53	-30,00
207	206	207	206,67	22,86	-50	-67	-64	-36,20
228	227	228	227,67	25,18	-59	-80	-74	-42,60
248	247	248	247,67	27,40	-64	-92	-83	-47,80
269	268	269	268,67	29,72	-68	-104	-87	-51,80
284	282	283	283,00	31,31	-67	-112	-90	-53,80
306	304	305	305,00	33,74	-61	-122	-88	-54,20
322	320	321	321,00	35,51	-53	-127	-80	-52,00
337	335	336	336,00	37,17	-44	-126	-70	-48,00
352	350	351	351,00	38,83	-41	-120	-56	-43,40
371	368	369	369,33	40,86	73	-107	62	5,60
377	374	375	375,33	41,52	92	-103	75	12,80
386	384	384	384,67	42,55	128	-103	110	27,00

Příloha E – tabulka 5 – měření kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu F$ do hvězdy

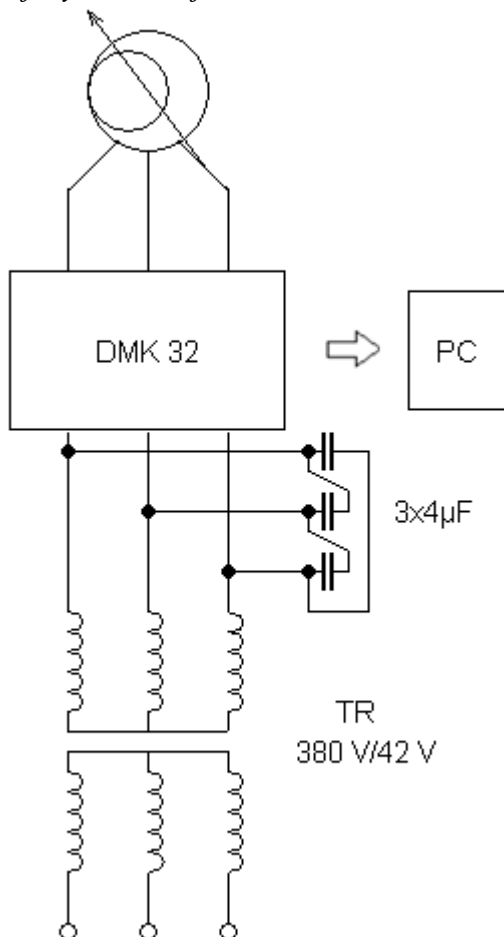
U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0
29	29	30	29,33	-2	-2	-2	-1,2
37	37	38	37,33	-4	-4	-5	-2,6
56	56	57	56,33	-7	-7	-8	-4,4
70	69	70	69,67	-11	-11	-12	-6,8
82	81	82	81,67	-15	-15	-16	-9,2
96	95	96	95,67	-21	-21	-22	-12,8
127	127	127	127,00	-35	-37	-38	-22
148	147	148	147,67	-48	-50	-52	-30
166	165	166	165,67	-62	-64	-65	-38,2
181	180	182	181,00	-73	-75	-77	-45
217	216	217	216,67	-104	-107	-110	-64,2
234	233	235	234,00	-121	-125	-128	-74,8
255	254	255	254,67	-150	-155	-160	-93
278	277	278	277,67	-168	-175	-179	-104,4
292	291	292	291,67	-187	-194	-198	-115,8
312	311	312	311,67	-212	-221	-224	-131,4
329	328	329	328,67	-237	-247	-249	-146,6
352	350	352	351,33	-272	-280	-285	-167,4
363	361	363	362,33	-289	-297	-304	-178
374	372	373	373,00	-306	-317	-322	-189
384	382	384	383,33	-324	-335	-340	-199,8

Příloha F – tabulka 6 – měření kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4 \mu F$ do trojúhelníka

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0
30	29	30	29,67	-8	-7	-7	-4,4
50	49	50	49,67	-18	-17	-19	-10,8
69	68	69	68,67	-34	-33	-36	-20,6
91	91	92	91,33	-60	-58	-63	-36,2
103	102	104	103,00	-76	-73	-79	-45,6
130	130	131	130,33	-119	-116	-126	-72,2
147	147	148	147,33	-153	-148	-161	-92,4
161	161	163	161,67	-193	-194	-209	-119,2
185	185	186	185,33	-240	-233	-254	-145,4
207	207	208	207,33	-299	-291	-316	-181,2
218	218	219	218,33	-330	-324	-350	-200,8
229	229	230	229,33	-364	-357	-387	-221,6
240	239	241	240,00	-399	-390	-422	-242,2
251	250	252	251,00	-436	-427	-463	-265,2
276	275	277	276,00	-525	-514	-559	-319,6
291	290	291	290,67	-582	-570	-615	-353,4
315	315	316	315,33	-688	-673	-727	-417,6
329	328	329	328,67	-741	-729	-781	-450,2
342	341	342	341,67	-799	-787	-845	-486,2
366	365	366	365,67	-917	-900	-967	-556,8
377	375	377	376,33	-970	-950	-1020	-588
388	386	388	387,33	-1030	-1010	-1080	-624

Příloha G – tabulka 7 – měření kompenzačních kondenzátorů $250\mu\text{F}$ do hvězdy

U12 [V]	U23 [V]	U31 [V]	Ustr [V]	Q1 [Var]	Q2 [Var]	Q3 [Var]	Qcelk [Var]
0	0	0	0	0	0	0	0
32	32	33	32,33	-6	-5	-6	-102
65	65	66	65,33	-20	-20	-20	-360
78	78	79	78,33	-29	-29	-30	-528
96	96	97	96,33	-42	-42	-44	-768
117	117	118	117,33	-67	-69	-71	-1242
128	128	129	128,33	-74	-74	-77	-1350
148	147	148	147,67	-97	-97	-101	-1770
170	169	170	169,67	-128	-128	-133	-2334
206	206	207	206,33	-188	-188	-194	-3420
227	226	227	226,67	-226	-226	-234	-4116
245	245	246	245,33	-264	-264	-272	-4800
268	267	268	267,67	-317	-316	-323	-5736
299	298	299	298,67	-391	-391	-400	-7092
331	329	330	330,00	-479	-479	-489	-8682
370	369	370	369,67	-600	-600	-613	-10878
383	381	382	382,00	-640	-642	-654	-11616

Příloha H - Schéma zapojení měření příkonu TR s připojenými kondenzátory $3 \times 4\mu\text{F}$ spojených do trojúhelníka**Příloha I** - Schéma zapojení pro měření jalového výkonu kompenzačních kondenzátorů $3 \times 4\mu\text{F}$ spojených do trojúhelníka