

2. За всяка една от построените векторни диаграми, по графичен път, се определя големината на тока в нулевия проводник като векторна сума от фазните токове.

3. От векторната диаграма за случая на несиметричен трифазен консуматор включен в трипроводна трифазна верига, по графичен път, се определя големината на потенциала на звездния център на консуматора.

Контролни въпроси

1. Каква е разликата между понятията трифазна система и трифазна верига?

2. Каква е връзката между линейни и фазни напрежения измерени върху консуматор свързан в звезда, ако захранващият генератор е симетричен?

3. Каква е връзката между линейни и фазни токове измерени върху консуматор свързан в триъгълник, ако захранващият генератор е симетричен?

4. Как на практика ще определите кой от четирите проводника на трифазната верига е нулев?

ЛАБОРАТОРНО УПРАЖНЕНИЕ № 9

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕДНОФАЗЕН ТРАНСФОРМАТОР

ЦЕЛ НА УПРАЖНЕНИЕТО

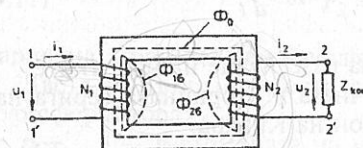
1. Изучаване на устройството и принципа на действие на трансформатора.

2. Снемане на неговите работни характеристики и опитно определяне на параметрите му.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Трансформаторът е статично електромагнитно устройство с две или повече магнитно свързани намотки. На основата на явлението взаимна индукция то преобразува електрическа енергия с едни стойности на напрежението и тока в енергия с други стойности на тези величини при запазване на честотата.

Намотките са поставени върху магнитопровод от листов електротехническа стомана, която има сравнително малки загуби на активна мощност от индуктираните вихрови токове и явлението магнитен хистерезис.



Фиг. 9.1

На фиг. 9.1 е показана принципна схема на еднофазен трансформатор с две намотки. Намотката с N_1 навивки, наречена първична, се включва към източник на променливо напрежение u_1 , а намотката с N_2 навивки - наречена вторична - към консуматора $Z_{\text{конс}}$.

Основни паспортни данни на всеки трансформатор са:

U_{1H}, U_{2H} - номинални първично и вторично напрежение;

I_{10} - ток на празен ход (п.х.) в % от I_{1H} ;

U_{1K} - напрежение на късо съединение (к.с.) в % от U_{1H} ;

S_H - номинална привидна мощност $S_H = U_{1H} \cdot I_{1H} = U_{2H} \cdot I_{2H}$;

I_{1H}, I_{2H} - номинални първичен и вторичен токове - изчисляват се от израза за S_H ;

η_H - номинален коефициент на поледно действие (к.п.д.);

$\cos \varphi_H$ - номинален фактор на мощността;

При включен източник на напрежение и консуматор към трансформатора (вж. фиг. 9.1) в първичната и вторичната намотки протичат

съответно токове i_1 и i_2 . От съвместното действие на техните м.д.н. $F_1 = N_1 \cdot i_1$ и $F_2 = N_2 \cdot i_2$ в магнитопровода се създава т.н. работен (основен) магнитен поток Φ_0 , който се изменя по синусоидален закон. Този магнитен поток индуцира в двете намотки е.д.н. e_1 и e_2 , чиито ефективни стойности са:

$$(9.1) \quad E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{0m} \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{0m},$$

където Φ_{0m} е амплитудната стойност на Φ_0 , а f - честотата на входното напрежение.

Отношението

$$(9.2) \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

се нарича коефициент на трансформация. При $n > 1$ трансформаторът е понижаваш, а при $n < 1$ повишаващ.

М.д.н. F_1 и F_2 освен потока Φ_0 създават и т.н. разсеяни магнитни потоци $\Phi_{1\sigma}$ и $\Phi_{2\sigma}$, които се затварят през въздушната среда около намотките N_1 и N_2 и индуцират в намотките допълнителни е.д.н. с моментни стойности

$$(9.3) \quad e_{1\sigma} = -L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} \quad \text{и} \quad e_{2\sigma} = -L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt},$$

където $L_{1\sigma}$ и $L_{2\sigma}$ са т.н. индуктивности на разсейване на намотките.

Електрическото равновесие на първичната и вторичната верига на трансформатора се изразява с втория закон на Кирхов:

$$(9.4) \quad u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + R_1 \cdot i_1;$$

$$(9.5) \quad e_2 + e_{2\sigma} = u_2 + R_2 \cdot i_2,$$

където с $R_1 \cdot i_1$ и $R_2 \cdot i_2$ са означени активните напрежителни падове в намотките.

Ако в (9.4) и (9.5) се въведат комплексните ефективни стойности на величините и е.д.н. e_1 и e_2 се заместят с еквивалентни напрежителни падове върху т.н. индуктивни съпротивления на разсейване на намотките $X_{1\sigma} = \omega \cdot L_{1\sigma}$ и $X_{2\sigma} = \omega \cdot L_{2\sigma}$ се получава

$$(9.6) \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1(R_1 + jX_{1\sigma});$$

$$(9.7) \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2(R_2 + jX_{2\sigma}).$$

Опитът при работа с трансформатора показва, че при изменение на тока i_2 от нула до номиналния, токът i_1 се изменя от i_{10} (ток на п.х.) до съответния номинален. Този факт позволява да се запише т.н. уравнение за равновесие на м.д.н. на трансформатора:

$$(9.8) \quad N_1 \cdot i_{10} = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$$

или в комплексен вид след обработка

$$(9.9) \quad \dot{i}_1 = \dot{i}_{10} + \left(-\frac{N_1}{N_2} \cdot \dot{i}_2 \right).$$

Уравненията (9.6), (9.7) и (9.8) представляват основата за анализ на режимите на работа на трансформатора.

При нормална работа трансформаторът консумира от мрежата активна мощност, наричана първична или входна

$$(9.10) \quad P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

и отдава на консуматора във вторичната верига

$$(9.11) \quad P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

наричана вторична или изходна.

Двете активни мощности се различават със загубите на мощност в трансформатора:

$P_{\text{ст}}$ - в стоманата на магнитопровода от хистерезис и вихрови токове;

P_{M1}, P_{M2} - в проводниците на намотките- $P_{M1} = R_1 \cdot I_1^2$, $P_{M2} = R_2 \cdot I_2^2$.

Загубите в намотките са променливи и зависят квадратично от токовете в намотките, т.е. от натоварването на трансформатора.

Възможни са следните режими на работа на трансформатора:

1. *На празен ход* с входно напрежение $U_1 = U_{1H}$ и $f = f_H$, при който няма включен консуматор ($Z_{\text{конс}} = \infty$, $I_2 = 0$).

От уравнението (9.9) се вижда, че първичният ток $I_1 = I_{10}$ е твърде малък поради липса на вторично м.д.н. ($I_{10} \approx 10\% I_{1H}$). При този режим трансформаторът представлява бобина с феромагнитен магнитопровод, която консумира незначителна активна мощност:

$$(9.12) \quad P_{10} = U_{1H} I_{1H} \cos \varphi_{10} = P_{M1} + P_{\text{ст}} \approx P_{\text{ст}},$$

където p_{M1} са пренебрежимо малки загуби на мощност в първичната намотка в сравнение със загубите на мощност в стоманата.

За този режим на работа уравненията (9.6) и (9.7) добиват вида

$$(9.13) \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \quad \text{и} \quad \dot{U}_{20} = \dot{E}_{20},$$

което дава възможност за опитно определяне на коефициента на трансформация чрез измерване на напреженията U_1 и U_{20} , а именно

$$(9.14) \quad n_U = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}.$$

2. *На късо съединение* - с номинално входно напрежение и к.с. на вторичната страна ($Z_{\text{КОНС}} = 0$; $U_{2K} = 0$). Този режим е аварийен, опасен и недопустим, тъй като токовете I_{1K} и I_{2K} надвишават 10 - 30 пъти номиналните и предизвикват изгаряне и разрушаване на намотките.

Особен интерес представлява режимът на к.с. с номинални токове в намотките, установен с понижено входно напрежение $U_{1K} = (3-10)\% U_{1H}$. При него входната активна мощност е

$$(9.15) \quad P_{1K} = U_{1K} I_{1K} \cos \varphi_{1K} = P_{\text{СТК}} + P_{M1} + P_{M2} \approx P_{M1} + P_{M2},$$

където p_{M1} и p_{M2} са загубите в намотките при номинални токове, а $P_{\text{СТК}}$ са пренебрежимо малки загуби в стоманата при $U_{1K} \ll U_{1H}$.

3. *На натоварване* - това е работен режим с входно напрежение $U_1 = U_{1H}$ и честота $f = f_H$, включен консуматор на вторичната страна и изменение на тока I_2 от нула до I_{2H} . Напрежението на вторичната страна зависи от големината и характера на товара $Z_{\text{КОНС}}$ и може да се изрази чрез (9.7) и (9.13) като:

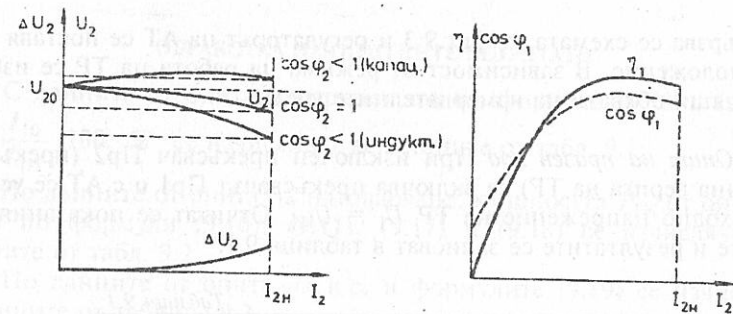
$$(9.16) \quad \dot{U}_2 = Z_{\text{КОНС}} \dot{I}_2 = \dot{U}_{20} - (R_2 + jX_{2\sigma}) \dot{I}_2.$$

Режимът на натоварване на трансформатора се представя нагледно чрез неговите работни характеристики. Това са зависимостите на вторичното напрежение U_2 , вторичния напрежителен пад ΔU_2 , фактора на входната активна мощност $\cos \varphi_1$ и к.п.д. η от тока I_2 при $U_1 = U_{1H} = \text{const}$, $f = f_H$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$, примерно показани на фиг.9.2.

Вторичният пад ΔU_2 се определя с израза:

$$(9.17) \quad \Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100, \quad \%$$

а $\cos \varphi_1$ - посредством израза (9.10).



Фиг.9.2

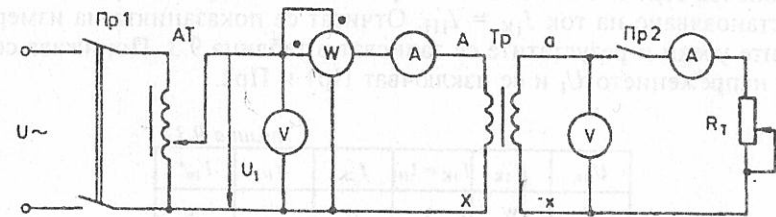
Характеристиката $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ показва изменението на съотношението между активната и реактивната мощност, използвани в трансформатора. При увеличаване на активното натоварване на трансформатора $\cos \varphi_1$ и η нарастват. Този факт е твърде съществен и трябва да се има предвид при избора на трансформатора по мощност с оглед по-икономичен режим на работа.

К.п.д. на трансформатора се определя пряко и косвено:

$$(9.18) \quad \eta_{\text{пр}} = \frac{P_2}{P_1}; \quad \eta_{\text{косв}} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p_{\text{заг}}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{10} + P_{1K} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2}.$$

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

Извършва се по схемата от фиг. 9.3, която съдържа изследвания трансформатор ТР с първична намотка А-Х, вторична намотка а-х, регулируем автотрансформатор АТ и товарния резистор R_T .



фиг.9.3

Свързва се схемата от фиг.9.3 и регулаторът на АТ се поставя в нулево положение. В зависимост от режима на работа на ТР се избират подходящи обхвати на измервателните уреди.

1. *Опит на празен ход* При изключен прекъсвач Пр2 (прекъснатата вторична верига на ТР) се включва прекъсвачът Пр1 и с АТ се установява входно напрежение на ТР $U_1 = U_{1H}$. Отчитат се показанията на уредите и резултатите се записват в таблица 9.1.

Таблица 9.1

| U_{1H} | I_{10} | P_{10} | U_{20} | $\cos \varphi_1$ | n_t | I_{10}^* |
|----------|----------|----------|----------|------------------|-------|------------|
| V | A | W | V | - | - | % |
| | | | | | | |

2. *Опит на натоварване* Включва се прекъсвачът Пр2 и като се поддържа с АТ $U_1 = U_{1H}$ посредством товарния резистор R_T се задават последователно няколко нарастващи стойности на I_2 в интервала от нула до I_{2H} и при всяка от тях се отчитат показанията на измервателните уреди. Резултатите се записват в таблица 9.2.

Таблица 9.2

| № | U_1 | I_1 | P_1 | U_2 | I_2 | $\cos \varphi_1$ | P_2 | η_{TP} | η_K | ΔU_2 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------------|----------|--------------|
| | V | A | W | V | A | - | W | - | - | % |
| | | | | | | | | | | |

Трансформаторът се разтоварва, намалява се до нула входното напрежение и се изключват Пр2 и Пр1.

3. *Опит на късо съединение* При положение $R_T = 0$ и включен Пр2 се включва Пр1 и с АТ плавно се повишава от нула напрежението U_1 до установяване на ток $I_{1K} = I_{1H}$. Отчитат се показанията на измервателните уреди и резултатите се записват в таблица 9.3. Понижава се до нула напрежението U_1 и се изключват Пр1 и Пр2.

Таблица 9.3

| U_{1K} | P_{1K} | $I_{1K} = I_{1H}$ | I_{2K} | n_v | I_{10}^* |
|----------|----------|-------------------|----------|-------|------------|
| V | W | A | A | - | % |
| | | | | | |

ОБРАБОТКА НА ОПИТНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

1. С данните от опита на празен ход по формули (9.10), (9.14) и $I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_{1H}} \cdot 100, \%$ се изчисляват величините от табл. 9.1.

2. По данните от опита на натоварване, мощността P_{1K} от опита на к.с. и по формули (9.10), (9.11), (9.17) и (9.18) се изчисляват величините от табл. 9.2.

3. По данните от опита на к.с. и формулите (9.19) се изчисляват величините от таблица 9.3.

$$(9.19) \quad U_{1K}^* = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100, \%; \quad \eta_I = \frac{I_{2K}}{I_{1K}}$$

4. С данните от табл. 9.2 се построяват работните характеристики на трансформатора при активен товар ($\cos \varphi_2 = 1$), аналогично с показанията на фиг. 9.2.

Контролни въпроси

1. Върху кое физическо явление е основано действието на трансформатора?

2. Защо магнитопроводът се изработва от листов електротехническа стомана, изолирана едностранно?

3. Как се определят опитно загубите на мощност в трансформатора?

4. По какво се различават опита на к.с. с трансформатора от аварийното к.с.?

5. Обяснете защо промяната на вторичния ток на трансформатора предизвиква аналогична промяна на първичния?

6. Обяснете с работните характеристики за $\cos \varphi_1$ и η защо не трябва да се презапасяваме по мощност при избор на трансформатор?