

Лабораторная работа №1

Определение кривой намагничивания стали сердечника трансформатора

Цель работы: практическое применение закона полного тока и закона электромагнитной индукции; ознакомление с основными свойствами электротехнических сталей.

Основы теории

Кривой намагничивания ферромагнитного материала называется геометрическое место точек вершин частных петель перемагничивания. Таким образом, кривая намагничивания является, некоторой усреднённой характеристикой магнитных свойств стали. Кривая намагничивания даётся в виде зависимости $B(H)$ и может быть представлена в виде таблиц, графика или аналитическом виде (некоторой аппроксимирующей функции).

Индукция B (Тл) и напряженность магнитного поля H (А/м) внутри сердечника связаны с электрическими параметрами внешней цепи синусоидального тока, под действием которого происходит перемагничивание. В режиме холостого хода трансформатора приложенное внешнее напряжение уравнивается э.д.с. самоиндукции намагничивающей обмотки. Эта э.д.с. определяется законом электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -W\frac{d\phi}{dt}$$

При синусоидальном потоке $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ действующее значение э.д.с. самоиндукции определяется выражением

$$E = 4,44wf\Phi_m,$$

где w -число витков обмотки,

f - частота сети, $f=50$ Гц,

Φ_m - амплитуда магнитного потока, $\Phi_m = B_m S$,

где S - поперечное сечение стали сердечника.

Исходя из вышесказанного, следует

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} \text{ - координата вершины}$$

петли гистерезиса при данном токе.

В режиме холостого хода, пренебрегая незначительным падением напряжения на активном и индуктивном сопротивлении первичной обмотки, в соответствии со вторым законом Кирхгофа приложенное первичное напряжение уравнивается э.д.с. самоиндукции

$$u = -e$$

Относительно действующих значений величин можно записать

$$U = E$$

Максимальное значение индукции при заданном напряжении рассчитывается по формуле

$$B_m = \frac{U}{4,44wfS} = \frac{1}{4,44wfS}U = K_B U$$

Определив постоянный коэффициент K_B и, задаваясь различными напряжениями ($U=(0,1 - 1,2)U_{ном}$) получают ряд значений B_m .

Координату H_m вершины частной петли перемангничивания при заданном напряжении можно определить по закону полного тока. Для однородной магнитной цепи (цепи, имеющей постоянное сечение и материал по всей длине магнитопровода) можно записать

$$H_m l_\mu = I_m w,$$

где - H_m , I_m - амплитуды напряжённости и тока намагничивания,

l_μ - длина средней магнитной линии,

w - число витков намагничивающей обмотки.

Для неоднородного магнитопровода с одной намагничивающей обмоткой закон полного тока имеет вид

$$\sum H_{mi} l_{\mu i} = I_m w$$

Напряженности i -ых участков определяются на основании непрерывности магнитного потока.

Для однородного магнитопровода, зная величину измеренного действующего значения намагничивающего тока и считая этот ток синусоидальным (что достаточно точно до индукции насыщения), можно определить амплитуду напряжённости магнитного поля, соответствующую некоторой вершине некоторой частной петли перемангничивания

$$H_m = \frac{\sqrt{2}w}{l_\mu} I = K_H I$$

Таким образом, задаваясь рядом значений напряжений в указанном выше диапазоне, получают экспериментально ряд значений намагничивающего тока. Замерив сечение магнитопровода и длину средней магнитной линии, полученную зависимость $I(U)$ можно пересчитать в искомую зависимость $B(H)$ по приведённым выше соотношениям.

3. При подготовке к лабораторному занятию в журнале лабораторных работ изобразить схему опыта и заготовить таблицу зависимости $I(U)$.

4. При обсуждении эксперимента указать студентам на экспериментальный способ определения числа витков обмотки намагничивания по известному числу витков дополнительной обмотки. Показать студентам желательный диапазон изменения напряжения, при котором индукция в сердечнике превысит индукцию насыщения. Для этого в качестве намагничивающей обмотки нужно

выбрать обмотку низшего напряжения, так как на лабораторных стендах невозможно установить напряжение более 220 вольт. Обмотка низшего напряжения рассчитана на 127 вольт и использование этой обмотки в качестве первичной позволяет достичь желаемого результата.

5. Выполнение лабораторных исследований.

При определении числа витков намагничивающей обмотки трансформатора подать на неё номинальное напряжение и замерить напряжение дополнительной обмотки U_d с известным числом витков w_d .

Для снятия зависимости $I(U)$ задать ряд значений (6 - 8 точек) напряжений. Максимальное значение напряжения выбрать больше номинального на 20%.

В заключение выполнения лабораторной работы провести обмер сердечника для установления сечения магнитопровода (коэффициент заполнения стали принять равным 0,95) и длины средней магнитной линии. Если в лабораторной работе используется трёхфазный трансформатор в однофазном режиме, то, в первом приближении считать, что магнитный поток замыкается по среднему стержню. При этом намагничивающую обмотку выбрать на крайнем стержне в месте установки дополнительной обмотки.

6. Подготовка отчёта.

В отчёте привести вычисление витков намагничивающей обмотки.

Число витков на вольт (по принятому в теории трансформаторов понятию) или сколько витков должна содержать обмотка, чтобы напряжение на её зажимах было бы равно одному вольту:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_d}{w_d}$$

Число витков искомой обмотки

$$w = \frac{U_{2\text{ном}}}{U_{\text{в}}} = \frac{U_{2\text{ном}}}{U_d} w_d$$

По результатам зависимости $I(U)$ составить таблицу $B(H)$ и изобразить в масштабе график этой зависимости.

7. Контрольные вопросы к защите лабораторной работы.

Защита лабораторной работы проводится в установленное преподавателем время и заключается в ответах на примерные вопросы:

1. Что представляет собой кривая намагничивания ферромагнитного материала?
2. Что такое частные и предельные циклы перемагничивания? Как они зависят от частоты?
3. Привести зависимость $B(H)$ для диа - и парамагнетиков.
4. Формулировка, запись и интерпретация закона электромагнитной индукции.
5. Формулировка и запись закона полного тока для однородного и неоднородного магнитопровода.

6. Как можно экспериментально определить неизвестное число витков трансформатора?

8. Рекомендуемая литература.

1. Электротехника/ Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. Учебник для вузов 2-е изд., перераб. И доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985.- 552с., ил. (См. разделы 6.2 стр. 196 - 200, 6.3 стр. 200 - 202).

2. Раздел электромагнетизма курса физики.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы

Целью настоящей работы является определение коэффициента мощности однофазного трансформатора в режиме холостого хода и частичных нагрузок. При этом для определения влияния трансформатора на реактивную составляющую передаваемого тока, нагрузка трансформатора выполнена активной.

2. Основы теории

В системах передачи электроэнергии силовые трансформаторы являются необходимыми элементами этих систем. В местах производства электроэнергии по соображениям габаритных допустимых размеров электрогенераторов генерируемое напряжение составляет $10 \div 35$ КВ. Для экономической передачи электрической энергии на дальние расстояния это напряжение необходимо повысить до 100- 1250 кВ. В местах приема электроэнергии высокое напряжение необходимо снизить до приемлемых значений. Причем это снижение может осуществляться ступенчато на уровне района, затем предприятия, затем цеха. Таким образом, в линии передачи электроэнергии установленная мощность трансформаторов в несколько раз больше установленной мощности электрогенераторов. (Минимальное соотношение 2:1). В связи с этим представляется целесообразным установить влияние силового трансформатора на коэффициент мощности системы передачи электроэнергии.

Силовым трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, состоящее из сердечника, набранного из отдельных (толщиной $0,3 \div 0,5$ мм), изолированных друг от друга листов электротехнической стали и обмоток, электрически не связанных друг с другом. Это устройство предназначено для преобразования одной, первичной системы переменного тока с параметрами U_1, I_1 , в другую вторичную обмотку переменного тока U_2, I_2 той же частоты.

Передача энергии из первичной во вторичную обмотку осуществляется электромагнитным путем. Расчет мощности магнитного поля в сердечнике трансформатора показывает ($P_{эм} = W_{эм} / T = BH / 2T$), что эта мощность равна мощности потерь в стали сердечника трансформатора (пропорциональна площади петли гистерезиса) и несколько уменьшается с увеличением нагрузки трансформатора. В первичной обмотке трансформатора наводится э.д.с. самоиндукции, а во вторичной - э.д.с. взаимной индукции

$$e_1 = -w_1 \frac{d\phi_1}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\phi_2}{dt}$$

где ϕ_1, ϕ_2 , - магнитные потоки, сцепленные со своими обмотками. Эти потоки имеют общую составляющую - основной или рабочий магнитный поток и небольшие потоки рассеяния каждой обмотки.

Для первичной и вторичной обмотки в соответствии со вторым законом Кирхгофа записываются уравнения электрического равновесия. В комплексной форме для стационарного режима эти уравнения имеют вид:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(r_1 + jx_{s1}) \quad (2)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2(r_2 + jx_{s2}) \quad (3)$$

где $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_1, \underline{I}_2$ - комплексы напряжений и э.д.с. первичной и вторичной обмотки;

r_1, r_2 - активные сопротивления первичной и вторичной обмотки;

x_{s1}, x_{s2} - индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток.

Уравнения (2) и (3) в теории трансформаторов дополняются еще одним уравнением, которое носит название трансформаторного закона:

$$\underline{I}_0 W_1 = \underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2 \quad (4),$$

где \underline{I}_0 - ток холостого хода трансформатора.

Магнитодвижущая сила (м.д.с.) $\underline{I}_0 W_1$ в режиме различных нагрузок примерно остается неизменной. Действительно увеличение тока \underline{I}_2 ведет к росту тока \underline{I}_1 , а направление м.д.с. $\underline{I}_2 W_2$ согласно правилу Ленца противоположно действию м.д.с. $\underline{I}_1 W_1$.

В теории трансформаторов рассматриваются Т и Г-образные схемы замещения. При этом параметры вторичной обмотки приводятся к первичной или первичной обмотки ко вторичной в зависимости от задачи исследования. Относительно входных и выходных зажимов наиболее целесообразной является Г-образная схема замещения (рис.2.1).

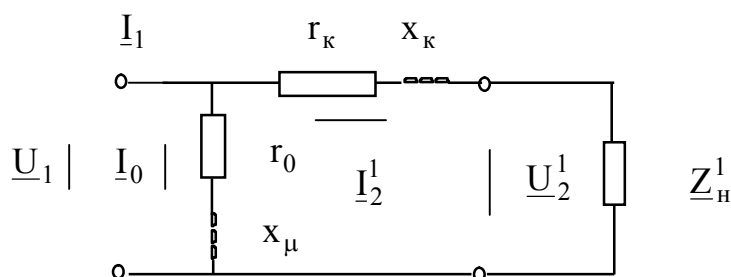


Рис.2.1. Г-образная схема замещения трансформатора

На рисунке 2.1. приняты следующие обозначения (для понижающего трансформатора)

$U_1 I_1$ - напряжение и ток первичной обмотки;

I_0 - ток холостого хода;

$I_2^1 = I_2 / n$ - приведенный ток вторичной обмотки к первичной
(здесь n - коэффициент трансформации; $n = W_1 / W_2$ -
отношение числа витков обмотки высшего напряжения
к числу витков обмотки низшего напряжения);

$U_2^1 = U_2 \cdot n$ - приведенное к первичной обмотке вторичное напряжение трансформатора;

r_k, x_k - параметры короткого замыкания трансформатора
(определяются в опыте короткого замыкания);

$$r_k = r_1 + r_2^1; \quad x_k = x_{s1} + x_{s2}^1;$$

$r_2^1 = r_2 n^2, \quad x_{s2}^1 = x_{s2} \cdot n^2$ сопротивления вторичной обмотки, приведенные к первичной обмотке.

$\underline{Z}_n^1 = \underline{Z}_n \cdot n^2$ - комплексное сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.

r_0 - сопротивление, соответствующее потерям в стали:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2},$$

где - P_0, I_0 мощность и ток в опыте холостого хода трансформатора.

x_μ - индуктивность намагничивания трансформатора. Она связана с основным, рабочим потоком следующими соотношениями:

$$x_\mu = 2\pi f L_\mu = 2\pi f \frac{\Psi_p}{I_0} = 2\pi f W_1 \frac{\Phi_p}{I_0} = 2\pi f W_1 \frac{SB}{I_0},$$

где - Φ_p, Ψ_p - рабочий (основной) магнитный поток и потокосцепление соответственно.

Для определения фазового сдвига между входным напряжением \underline{U}_1 и током \underline{I}_1 можно использовать схему, представленную на рисунке 2.1.

$$\underline{Z}_{ex} = \frac{[(r_k + r_n^1) + j(x_k + x_n^1)](r_0 + jx_\mu)}{(r_k + r_n^1 + r_0) + j(x_k + x_n^1 + x_\mu)} = r_{ex} + jx_{ex} \quad (5)$$

Искомый фазовый сдвиг определяется из треугольника сопротивлений:

$$x = \cos \varphi = \arctg \frac{x_{ex}}{r_{ex}} \quad (6)$$

Уравнения (2), (3) и (4) могут быть переписаны относительно приведенных параметров:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= -E + I_1(r_1 + jx_{s1}) \\
 \underline{U}_2^1 &= \underline{E}_2^1 - \underline{I}_2^1(r_2^1 + jx_{s2}^1) \\
 \underline{I}_0 W_1 &= \underline{I}_1 W_1 + \underline{I}_2 W_2
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

В соответствии с уравнениями (7) для трансформатора может быть построена векторная диаграмма (рис.2.2), на которой можно проследить зависимость коэффициента мощности от нагрузки.

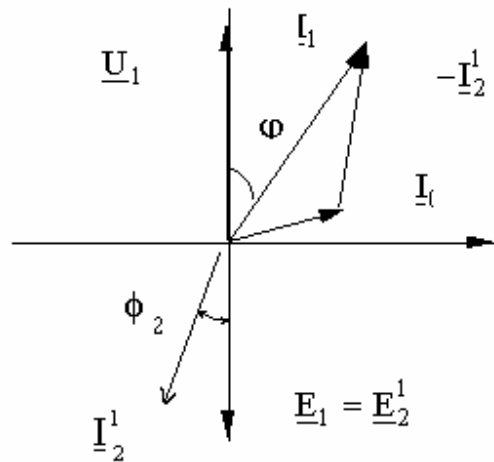


Рис.2.2. Векторная диаграмма трансформатора

3. Подготовка к лабораторной работе

В журнале лабораторных работ привести: схему опыта короткого замыкания однофазного трансформатора и описать условия его проведения, схему опыта холостого хода, а также описать условия его проведения, схему опыта нагрузки, в котором измеряются: напряжение и ток первичной обмотки, активная мощность потребляемая трансформатором, ток и напряжение вторичной обмотки. К опыту нагрузки заготовить таблицу измеренных (U_1, I_1, P_1, U_2, I_2) и вычисляемых величин. К последним относятся: полная мощность, потребляемая трансформатором из сети $S_1 = U_1 I_1$, коэффициент мощности $\cos \phi = P_1 / S_1$, и коэффициент мощности, вычисленный по формуле (6), коэффициент нагрузки $\beta = I_2 / I_2$, сопротивление нагрузки $r_n = U_2 / I_2$ (нагрузка активная), сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке ($r_n^1 = r_n \cdot n^2$). Коэффициент трансформации n был определен в лабораторной работе №1. В журнал лабораторных работ занести паспортные данные трансформатора.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к лабораторной работе

Перед началом обсуждения эксперимента преподаватель проверяет схемы опытов и заготовленную таблицу опыта нагрузки и делает по ним замечания. Затем производится опрос студентов по условиям проведения каждого опыта. При этом особое внимание следует обратить на ожидаемые значения измеряемых величин с тем, чтобы при сборке схемы выбрать на стенде нужные приборы. Например, ток холостого хода трансформатора составляет единицы процентов номинального тока, а напряжение короткого замыкания значительно меньше номинального напряжения. Опыт нагрузки необходимо начать с холостого хода, а предельные значения тока нагрузки выбрать не более половины номинального тока.

5. Выполнение лабораторной работы

Собрать схему. В качестве первичной обмотки использовать обмотку низшего напряжения, что позволит зайти в область насыщения стали трансформатора. Задаваясь рядом значений напряжения ($50 \text{ В} - 1,2 U_{\text{ном}}$) записать значения тока.

6. Подготовка отчета

В таблице опыта нагрузки определить вычисляемые величины.

В одной системе координат построить зависимость коэффициента мощности χ от коэффициента нагрузки β . Таких кривых должно быть две. Коэффициент мощности для одной кривой определяется по формуле $\cos \varphi_1 = P_1 / S_1$, а для второй - по формуле (6).

В масштабе построить векторную диаграмму трансформатора для одного из коэффициентов нагрузки, указанного преподавателем.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое схема замещения трансформатора?
2. Изобразить и назвать параметры Г-образной схемы замещения трансформатора.
3. Уравнения трансформатора и его векторная диаграмма.
4. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
5. Причины реактивности трансформатора.
6. Как меняется и почему коэффициент мощности трансформатора?

8. Рекомендуемая литература

1. Конспект лекций по дисциплине “Электрические машины”.
2. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - стр.(83 – 91).

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка эффективности компенсации реактивной мощности трансформатора с помощью конденсаторов, включенных параллельно первичной обмотке (поперечная компенсация).

2. Основы теории

Как было показано в п.2 лабораторной работы №2 комплексное сопротивление нагрузки линии электропередачи можно представить так:

$$\underline{Z}_H = r_H + jx_H$$

Для основных преобразователей электрической энергии - трансформаторов и асинхронных двигателей нагрузка носит активно-индуктивный характер. Ток нагрузки таких преобразователей отстает по фазе от питающего напряжения на угол

$$\varphi = \arctg \frac{x_H}{r_H}$$

Ток нагрузки формально можно представить в виде активной и реактивной составляющей (рис.3.1).

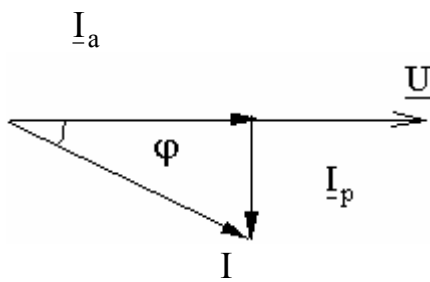


Рис.3.1. Векторная диаграмма

Активная составляющая тока I_a соответствует некоторой активной мощности

$$P = UI \cos \varphi$$

Реактивная составляющая тока I_p соответствует циркуляции энергии - в некоторую часть периода электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля индуктивности, которая определяет индуктивное сопротивление. В другую часть периода энергия, запасенная в магнитном поле, преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть и нагрузку. Колебания мгновенной мощности происходят с удвоенной частотой сети:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_U) I_m \sin(\omega t + \psi_i) = UI \cos \varphi - \\ + UI \cos(2\omega t + \psi_U + \psi_i)$$

Положительные значения $p(t)$, соответствуют активной мощности, отрицательные - реактивной. Интегральное значение реактивной мощности определяется выражением:

$$Q = UI \sin \varphi$$

Для определения активной мощности можно пользоваться выражениями

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi = I^2 r_H$$

Соответственно для вычисления реактивной мощности справедливы формулы

$$Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi = I^2 x_H$$

Реактивную мощность емкостной нагрузки записывают со знаком минус.

Активную и реактивную мощность также можно вычислить, если использовать произведение комплекса напряжения на сопряженный комплекс тока:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = S \cos \varphi + jS \sin \varphi = P + jQ$$

Как следует из векторной диаграммы (см. рис.3.1.) ту же самую активную мощность можно передать, если уменьшить угол φ до нуля, т.е. исключить реактивную составляющую тока \underline{I}_p . Для этого в цепь питания нагрузки ввести емкостный элемент, ток которого опережает напряжение на 90 электрических градусов и по величине равен реактивному току нагрузки. Следует заметить, что включение синусного конденсатора ни коим образом не влияет на режим работы нагрузки в предположении, что сеть обладает бесконечной мощностью или, что одно и то же, имеет внутреннее сопротивление равное нулю. Емкостные элементы достаточно хорошо реализуются с помощью косинусных конденсаторов, которые можно включить параллельно нагрузке (рис.3.2)

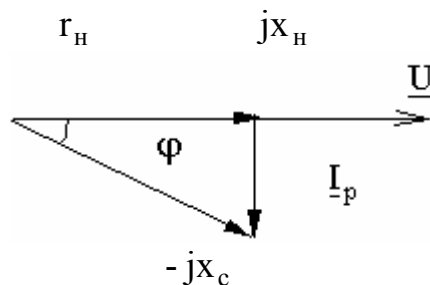


Рис.3.2. Схема включения конденсаторов

При полной компенсации реактивной составляющей тока нагрузки приведенная схема соответствует полной компенсации, а в цепи возникает резонанс токов. Величину косинусного конденсатора можно определить из следующих соображений.

Ток синусного конденсатора должен быть равен току реактивной составляющей активно-индуктивной нагрузки

$$I_c = I_p$$

$$\text{где } I_p = I \sin \varphi = \frac{U}{\sqrt{r_H^2 + x_H^2}} \sin(\operatorname{arctg} \frac{x_H}{r_H})$$

Так как $I_c = \frac{U}{x_c} = U2\pi fC$, то величина емкости конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{1}{2\pi f \sqrt{r_H^2 + x_H^2}} \sin(\operatorname{arctg} \frac{x_H}{r_H})$$

При полной компенсации реактивной мощности или, что одно и то же, при резонансе токов входное сопротивление цепи носит чисто активный характер:

$$\underline{Z}_{вх} = r_{вх}$$

При определенных условиях данная цепь может иметь колебательный затухающий переходный процесс. Резонансная частота колебательности

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{r}{2L})^2},$$

декремент затухания

$$\alpha = -r/2L$$

При различных нагрузках (сопротивление нагрузки переменное) - может меняться как активная, так и реактивная составляющая нагрузки. Поэтому, для полной компенсации реактивной мощности, необходимо включать различные по величине емкости косинусных конденсаторов.

Величину ёмкости компенсирующих конденсаторов можно определить по опытным данным, замерив активную мощность потребляемую из сети P , величину тока I и напряжение на зажимах потребителя U . Произведение тока на напряжение даёт величину полной мощности S . Отношение активной мощности к полной представляет собой коэффициент мощности. Произведение тока на синус угла коэффициента мощности есть величина реактивного тока, который должен быть скомпенсирован током батареи конденсаторов. Таким образом, величина ёмкости компенсирующих конденсаторов может быть определена по формуле:

$$C = \frac{I}{2\pi f U} \sin(\arccos \frac{P}{S})$$

Следует заметить, что трансформатор представляет собой нелинейную цепь, в которой возникают высшие гармоники тока. Поэтому полная компенсация реактивной мощности цепи со сталью, т.е. трансформатора невозможна.

3. Подготовка к лабораторной работе

По данным лабораторной работы №2 рассчитываются значения емкости косинусного конденсатора в режиме холостого хода. Определить резонансную частоту и декремент затухания. Заготовить таблицу со столбцами

$\beta, I_2, C, U_1, I_1, P_1$ (значения β и I_2 взять из соответствующей таблицы лаб. раб. №2).

4. Обсуждение эксперимента и допуск к лабораторной работе

Перед допуском к лабораторной работе преподаватель проверяет у студентов заготовленную таблицу эксперимента с вычисленными значениями компенсирующих конденсаторов.

5. Выполнение лабораторной работы

Собрать схему опыта как в лабораторной работе №2 (без компенсирующих конденсаторов). Выключить питание стенда и подключить компенсирующие конденсаторы согласно вычисленным значениям с возможно минимальной погрешностью. Включить стенд и зафиксировать показания приборов.

6. Подготовка отчета

В отчете сделать вывод о параллельной компенсации реактивной мощности и ее эффективности с учётом следующего замечания. Полная компенсация реактивной мощности лабораторных трансформаторов невозможна из-за нелинейности зависимости входного тока от напряжения на входных зажимах.

7. Контрольные вопросы

1. Объяснить характер активно-индуктивной нагрузки основных преобразователей электрической энергии - трансформаторов и асинхронных двигателей.

2. Что такое электрический резонанс и в частности резонанс токов?

3. Почему в цепях с нелинейной нагрузкой нельзя добиться полной компенсации реактивной энергии?

8. Рекомендуемая литература

1. Конспект лекций.

2. Борисов Ю.М. и др. Электротехника. – М.:1985. – с(100-111).

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С МОДЕЛЬЮ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

1. Цель работы

Целью настоящей работы является определение влияния сопротивления линии электропередачи на энергетические показатели транспорта электрической энергии. Определяются потери энергии и изменение напряжения при различной длине линии электропередачи.

2. Основы теории

В общем случае линия электропередачи является объектом с распределенными параметрами и содержит распределенные по длине линии активное сопротивление, индуктивность и емкость. Активное сопротивление зависит от сечения и материала проводника линии. Индуктивность и емкость определяется расстоянием между проводами.

В данной работе рассматривается упрощенная модель линии электропередачи, которая представлена сосредоточенным резистивным элементом. Модель такого объекта представлена на рисунке 4.1.

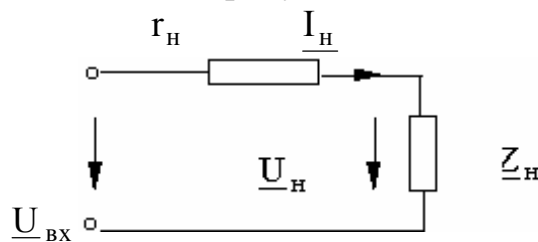


Рис.4.1. Упрощённая модель линии электропередачи.

При токе нагрузки $\underline{I}_н$ в линии электропередачи создается падение напряжения

$$\underline{U}_л = r_л \cdot \underline{I}_н$$

Напряжение на нагрузке $\underline{U}_н$ отличается от напряжения в начале линии электропередачи $\underline{U}_{вх}$

$$\underline{U}_н = \underline{U}_{вх} - r_л \underline{I}_н$$

В активном сопротивлении линии электропередачи электрическая энергия переходит в тепло. Мощность потерь в линии

$$P_л = I_н^2 r_л$$

Для обеспечения потребителей напряжением близким к номинальному, входное напряжение линии электропередачи делают больше номинального напряжения потребителей. Например, выходное напряжение трансформаторов

трансформаторной подстанции (ТП) составляет 240 вольт при номинальном напряжении потребителя 220 вольт. Потребители, подключенные ближе к ТП, питаются несколько более завышенным напряжением, чем потребители, подключенные в конце линии электропередачи, напряжение которых может быть меньше номинального на некоторую допустимую величину ($5 \div 15 \%$).

Линии электропередачи выполняются, как правило, алюминиевым проводом стандартного сечения (А16, А35, А50 и т.д.). Буква А обозначает материал провода - алюминий. Цифра в обозначении соответствует сечению скрученных проводников в квадратных миллиметрах.

Сечение линии электропередачи, которое и определяет ее сопротивление, может быть выбрано из двух независимых условий. В более ранние времена это сечение определялось по допустимой плотности тока при максимальной нагрузке. Для открытых воздушных линий электропередачи для алюминиевых проводов допустимая максимальная плотность тока составляет 20 ампер на квадратный миллиметр. В настоящее время с ростом стоимости цветных металлов сечение линии электропередачи выбирается исходя из экономических соображений. В задачу линейного программирования вводятся граничные условия по стоимости потерь электроэнергии и цене единицы длины линии электропередачи за некоторое время, которые в экономических теориях и расчётов называются удельными затратами.

Независимо от этого, уменьшение тока нагрузки за счет снижения ее реактивного тока, приводит к положительному результату - уменьшаются необратимые потери электрической энергии в линии электропередачи.

3. Подготовка к лабораторной работе

По данным лабораторной работы №2 рассчитать мощность потерь в линии электропередачи и изменение напряжения на нагрузке в режиме холостого хода. Сопротивление линии электропередачи принять равным значению, указанному на реостате при полном его включении. Напряжение на входе линии принять равным 200 вольт. В журнале лабораторных работ заготовить таблицу, в столбцы которых занести заданные данные - коэффициент нагрузки β , со-

противление нагрузки ($\underline{Z}_H = \frac{U_1}{I_1} \cos \varphi + j \frac{U_1}{I_1} \sin \varphi$), мощность потерь $P_{л} = I_1^2 r_{л}$, напряжение на нагрузке $U_n (U_n = 210 - I_1 r_n)$. Добавить в таблицу под рубрикой “измерено” $P_{л}$ и U_n . Последние данные будут выявлены в эксперименте.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к лабораторной работе

В начале данного занятия преподаватель проверяет заготовленную таблицу эксперимента с вычисленными значениями параметров. Затем на классной доске совместно с аудиторией преподаватель видоизменяет схему лабораторной работы №2 с тем, чтобы иметь возможность определить мощность потерь в линии электропередачи и замерить входное напряжение линии и напряжение непосредственно на зажимах нагрузки.

5. Проведение эксперимента

В режиме холостого хода замерить напряжение на входе и выходе линии электропередачи.

6. Оформление отчета

В отчете привести вычисления падения напряжения в линии электропередачи и величину мощности потерь.

7. Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяется напряжение вдоль однородной линии электропередачи?

2. Как влияют распределённые индуктивность и ёмкость на изменение напряжения вдоль линии электропередачи.

3. Из каких соображений выбирается сечение линии?

8. Рекомендуемая литература.

1. Конспект лекций.

2. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования /Под ред. Ю.Г.Барыбина – М. Энергоатомиздат, 1991. – 464 с. ил.(электроустановки промышленных предприятий /Под общ. Ред. Ю.Н.Тищенко.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния компенсации реактивной мощности на потери в линии электропередачи и изменение напряжения в конце линии в режиме холостого хода и частичных нагрузок однофазного трансформатора.

2. Основы теории

Компенсация реактивной мощности электрических преобразователей энергии приводит к уменьшению тока передаваемого по линии электропередачи. Это приводит к положительным результатам - уменьшаются падение напряжения в линии и мощность потерь

$$\underline{U}_л = r_л \cdot \underline{I}_н,$$

$$P_л = I_н^2 \cdot r_л$$

Формулы записаны для упрощенной модели линии электропередачи, которая представлена сосредоточенным резистивным элементом.

Рассмотрим изменение падения напряжения в линии и изменение мощности потерь в ней как функции коэффициента мощности нагрузки β , приняв за единицу значение этих функций для $\cos \varphi = 1$. Другими словами рассматриваются нормированные значения указанных функций. При данном рассмотрении будем считать постоянной величиной активную мощность, поступающую в линию электропередачи. Этому положению соответствует векторная диаграмма, приведенная на рисунке 5.1.

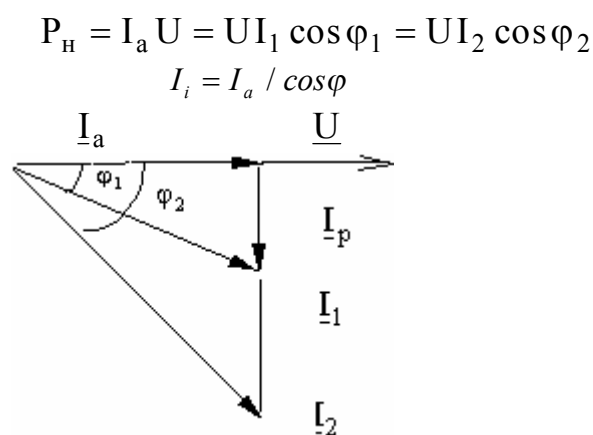


Рис.5.1. Векторная диаграмма

Для различных углов φ_u меняется только реактивная составляющая тока

$$I_{pi} = I_a \operatorname{tg} \varphi_i$$

При полной компенсации реактивной мощности составляющая тока I_a при условии постоянства передаваемой мощности будет величиной постоянной. Падение напряжения в линии будет определяться выражением $U_{л} = r_{л} I_a$. При отсутствии компенсации реактивной мощности падение напряжения в линии будет определяться полным током

$$U_{ли} = r_{л} I_i = r_{л} I_a / \cos \varphi$$

Нормированное изменение напряжения в функции угла будет определяться выражением

$$U_n = \frac{U_{ли}}{U_{л}} = \frac{r_{л} I_a / \cos \varphi}{r_{л} I_a} = \frac{1}{\cos \varphi}$$

Аналогичные рассуждения можно провести для мощности потерь в линии электропередачи при принятом выше условии постоянства передаваемой мощности.

При полной компенсации

$$P_{л} = I_a^2 r_{л}$$

При отсутствии компенсации

$$P_{ли} = (I_i / \cos \varphi)^2 r_{л}$$

Нормированная мощность потерь

$$P_n = \frac{P_{ли}}{P_{л}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

На рисунке 5.2. представлены графики изменения коэффициента мощности, нормированного изменения напряжения нагрузки и нормированного изменения мощности потерь в линии в функции фазового сдвига между входным током и напряжением линии передачи электроэнергии в предположении постоянства передаваемой активной мощности.

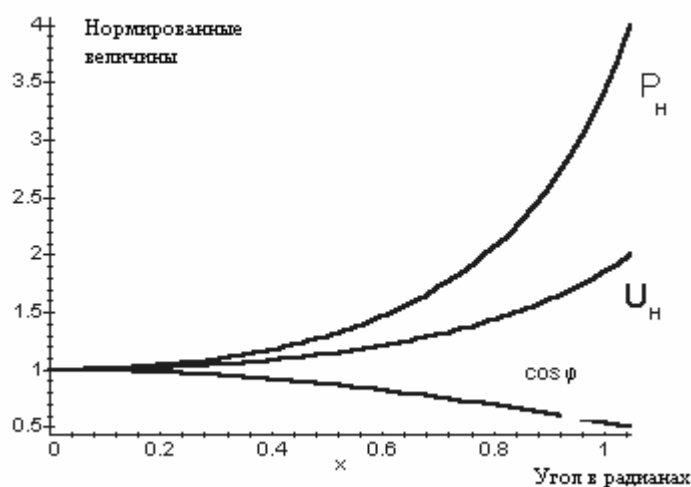


Рис. 5.2. Графики нормированных величин

Как следует из рассмотрения рисунка 5.2., например, увеличение фазового сдвига с нуля до 60 электрических градусов приводит к увеличению падения напряжения в два раза и в четыре раза увеличиваются потери мощности (на рис. 5.2. по горизонтальной оси угол представлен в радианах).

3. Подготовка к лабораторной работе

В журнале лабораторных работ изобразить схему включения однофазного трансформатора с моделью резистивной линии электропередачи. В схему включить приборы для изменения падения напряжения в линии, а также приборы для установки других параметров, которые следуют из следующей таблицы.

Заготовить таблицу испытаний, в которой отразить два раздела - “с компенсацией” и “без компенсации”. Каждый раздел должен содержать: напряжение на входе линии, напряжение в конце линии. Данные для коэффициента нагрузки и требуемых значений косинусных конденсаторов взять из предыдущих работ.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к лабораторной работе

При допуске к лабораторной работе преподаватель проверяет у каждого студента заготовленную схему и таблицу эксперимента и на аудиторной доске приводит эту схему и таблицу опыта.

Затем преподаватель намечает последовательность действий при проведении опытов..

5. Проведение эксперимента

На входе линии установить напряжение 200 вольт. В режиме холостого хода замерить напряжение на первичных зажимах трансформатора без компенсации и с компенсацией реактивной мощности. Данные опыта занести в таблицу.

6. Подготовка отчета

В отчете, в одной системе координат привести диаграммы сравнения падения напряжения и мощности потерь в линии для всех опытов. При этом желательно привести нормирование значений напряжений и мощности. В качестве нормирующей величины выбрать напряжение и мощность с полной компенсацией.

Сравнить полученные результаты с графиками, приведенными на рисунке 5.2. п.2. Сделать выводы.

7. Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяется падение напряжения вдоль однородной линии электропередачи?

2. Как и в каком месте можно компенсировать реактивность (распределенную индуктивность) линии электропередачи?

8. Рекомендуемая литература

1. Конспект лекций.

2. Л.В.Литвак. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. ГЭИ, М.Л. - 1963.

Лабораторная работа №6

Расчётно - практическая работа

ОПТИМАЛЬНАЯ (РАЦИОНАЛЬНАЯ) КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. Цель работы

Целью настоящей работы является овладение методикой расчета оптимального коэффициента реактивной мощности.

2. Основы теории

Оптимальный или наивыгоднейший коэффициент мощности можно выявить, исходя из двух условий:

А. Достижение наибольшей годовой экономии от снижения потерь энергии, обусловленных реактивной нагрузкой сети.

Б. Использование увеличенной пропускной способности сети (линий и трансформаторов) в связи с компенсацией реактивной нагрузки.

Как показывают расчеты, при наличии в схеме питания двух и более ступеней трансформации числовые значения оптимального коэффициента мощности получаются почти одинаковыми, практически близкими к единице, независимо от исходного условия «А» или «Б».

Если же предприятие питается на генераторном напряжении непосредственно с шин станции, то при расчете по условию «А» оптимальный коэффициент мощности, являясь функцией длины линии передач, может варьировать в очень широком диапазоне - от величины, близкой к единице, до значения, при котором искусственная компенсация реактивных нагрузок (с помощью компенсирующих устройств) экономически не оправдывается; при расчете же по условию «Б» оптимальный коэффициент мощности и в этом случае, т.е. при отсутствии промежуточных ступеней трансформации, близок к единице.

Так как условие «Б» не всегда может быть соблюдено (ибо, с одной стороны, не всегда возможно такая полная загрузка сети, при которой потери мощности до и после компенсации сохраняются неизменными, а с другой - не всегда возможно ограничиться установкой компенсирующего устройства при недостаточной пропускной способности сети), то в дальнейшем в качестве исходного условия при выявлении пределов рациональной компенсации нами будет приниматься только условие «А».

В основу методики определения оптимального коэффициента мощности, принципиально применимой к любой схеме питания, можно положить понятие *эквивалентной* длины линии, в которой потери активной мощности от реактивных нагрузок равны активным потерям в реальной схеме электроснабжения.

Оптимальный коэффициент мощности зависит от схемы питания промышленного предприятия и параметров питающей сети (напряжение, длины линий, удельного электрического сопротивления).

Начнем с простейшего случая, когда промышленное предприятие питается непосредственно с шин электростанции на генераторном напряжении (рис. 6.1).

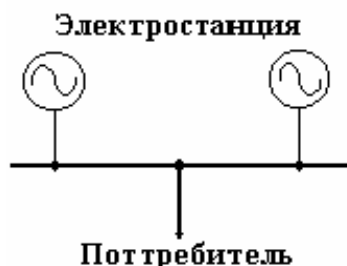


Рис. 6.1. Схема питания потребителя от шин электрической станции

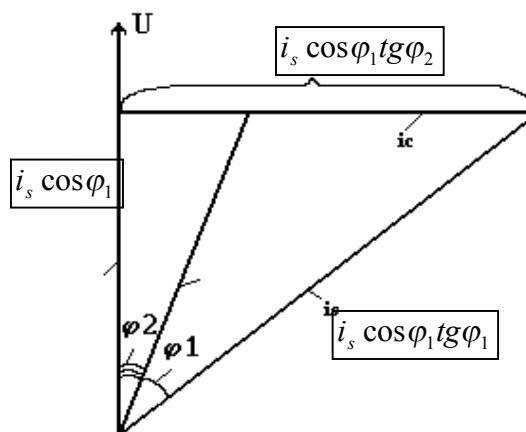


Рис. 6.2. Векторная диаграмма

При компенсации реактивной нагрузки сокращение активных потерь составляет (рис.6.2):

$$\Delta P = 3 i_s'^2 \xi^2 l \rho s - 3 i_s^2 \xi^2 l \rho s = 3 i_s'^2 \xi^2 \cos^2 \varphi_1 (tg^2 \varphi_1 - tg^2 \varphi_2) l \rho s, (1)$$

где i_s - средняя плотность тока в линии, $a / \text{мм}^2$;

i_s' - средняя плотность тока после компенсации током i_c ;

$\xi \approx 1,05$ - отношение среднеквадратичной плотности тока в линии к средней

плотности тока;

U и l - соответственно напряжение линии (кВ) и ее длина (км);

ρ и s - удельное электрическое сопротивление проводов линии и их сечение;

φ_1 и φ_2 - углы сдвига фаз до и после компенсации.

Соответствующее снижение годовых расходов составляет:

$$\Delta Z_1 = \Delta P T_6 Z_{y, \varphi} = 3 i_s'^2 \xi^2 \cos^2 \varphi_1 (tg^2 \varphi_1 - tg^2 \varphi_2) l \rho s T_6 Z_{y, \varphi}, (2)$$

где T_6 - годовое число часов работы компенсирующего устройства,
ч/год;

$z_{y.э}$ - удельные затраты (плановые или по действующему тарифу),
руб./квт·ч

$$\Delta z_2 = \sqrt{3} U_{i,s} \cos \varphi_1 (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)$$

где $z_{y.к}$ - удельные расчетные затраты, руб./квар·ч.

$$\Delta z = \Delta z_1 - \Delta z_2 = z_{y.э}^2 \cos^2 \varphi (tg \varphi - tg \rho) \times$$

$$\times \rho T_6 z_{y.э} - \sqrt{3} U_{i,s} \cos \varphi (tg \varphi - tg \rho) T_6 z_{y.к} \quad (4)$$

Приравняв нулю производную $\frac{d(\Delta z)}{d(tg \varphi_2)}$, получим простую расчетную формулу для оптимального $tg \varphi$:

$$tg \varphi_{2,э} = \frac{\left(\frac{z_{y.к}}{z_{y.э}} \right) \left(\frac{U}{i} \right)}{3,46 i_s \xi^2 \cos \varphi_1 \rho} \quad (5)$$

Определив $tg \varphi_{2,э}$, находим соответствующий оптимальный $\cos \varphi_{2,э}$ из выражения, которое получено из условия нахождения экстремума функции

$$\cos \varphi_{2,э} = 1 / (1 + tg^2 \varphi_{2,э})^{1/2}$$

3. Подготовка к лабораторной работе

Для заданных величин:

удельных затрат $z_{уд} = 12$ руб./квт.ч.,

удельных расчетных затрат 2 руб./квар.ч.,

напряжения $U = 200$ В.

длине линии $l = 1$ км ;

средней плотности тока $j = 20$ А/мм², $\rho = 0,022$ Ом и выбранных из л.р.3 двух опытов, включая опыт холостого хода, определить оптимальные значения синусных конденсаторов.

Для исследования эффективности компенсации реактивной мощности использовать схему лабораторной работы №5.

Заготовить сравнительную таблицу исследований с параметрами изменения напряжения в линии и мощности потерь для трех случаев - без компенсации, с полной компенсацией и оптимальной компенсацией (6 столбцов, 2 строки).

4. Обсуждение эксперимента и допуск к лабораторной работе

Перед началом работы преподаватель проверяет заготовленную таблицу результатов опытных данных с вычисленными оптимальными значениями синусных конденсаторов. Эффективность компенсации проводится по схеме лабораторной работы №5.

5. Проведение эксперимента

В режиме холостого хода и частичных нагрузок, устанавливая по заданному коэффициенту нагрузки требуемый ток нагрузки, измеряют напряжение в начале и конце модели линии электропередачи. Для каждой нагрузки включают требуемую величину синусных конденсаторов.

6. Оформление отчета

В отчете заполнить сравнительную таблицу исследований с вычисленными значениями мощности потерь в линии при оптимальной компенсации. Сделать вывод по изменению напряжения в линии и мощности потерь без компенсации, с полной и оптимальной компенсацией реактивной мощности. Особо отметить идею оптимальной компенсации.

7. Контрольные вопросы

1. В чем состоит смысл оптимальной компенсации реактивной мощности с помощью синусных конденсаторов?
2. Вывести формулу оптимальной компенсации.
3. Почему не рекомендуется работать энергосистемам с перекомпенсацией реактивной мощности?

8. Рекомендуемая литература

1. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. ГЭИ, МЛ. – 1963 –253с.ил.(стр.13 ÷ 16).
2. Конспект лекций.

Определение коэффициента мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

1. Цель работы.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение коэффициента мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в режиме холостого хода и частичных нагрузок при номинальном напряжении питания.

2. Основы теории.

В народном хозяйстве в настоящее время около 60 % всей электроэнергии потребляется асинхронными двигателями (АД), получившими большое распространение в качестве приводных двигателей различных производственных механизмов.

В отличие от трансформатора АД из-за наличия воздушного зазора между статором и ротором имеет значительный ток холостого хода. Этот ток составляет десятки процентов номинального тока двигателя. Наличие воздушного зазора между статором и ротором существенно увеличивает магнитное сопротивление цепи намагничивания и, следовательно, требуется большая величина намагничивающей силы для создания требуемого магнитного потока. Следует также заметить, что схема замещения фазы АД аналогична схеме замещения трансформатора (см. п.2 лаб. раб. №2 и рис. 7.2, 7.3) и по этому трансформаторы часто изучаются в теории электрических машин.

Ток фазы двигателя и фазовый угол между током и напряжением удобно рассматривать по круговой диаграмме АД (рис.7.1.).

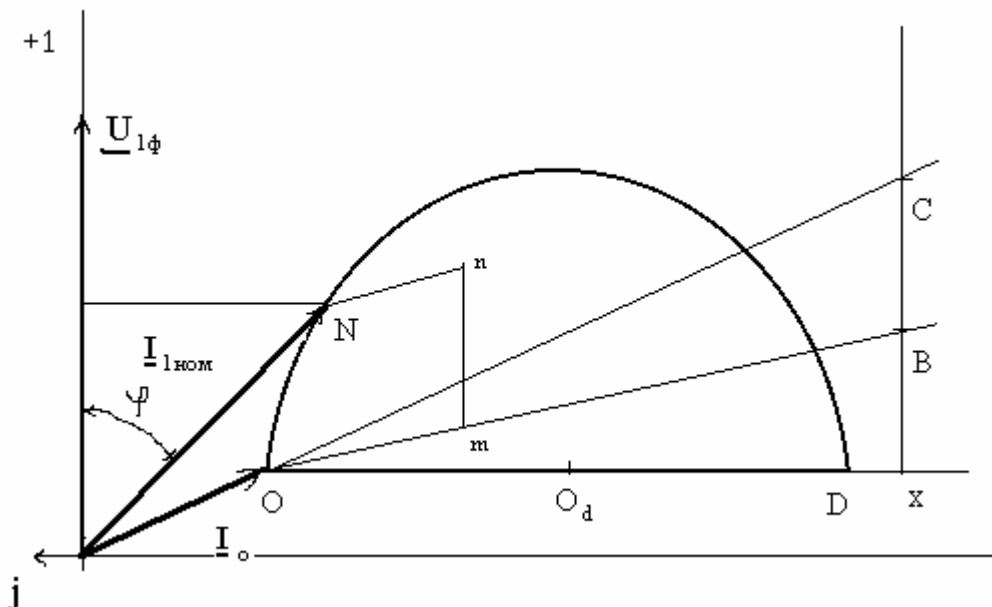


Рис. 7.1. Круговая диаграмма АД. Методика построения упрощенной круговой диаграммы и расчета рабочих характеристик по заданной схеме замещения для двигателей мощностью более 10 кВт

По схеме замещения фазы асинхронного двигателя, приведенной в справочнике (рис. 7.2), получают преобразованную схему (рис. 7.3). В преобразованной схеме (рис. 7.3) используют абсолютные величины. Для этого нормированные величины, приведенные в справочнике, необходимо перевести в абсолютные [1, стр.63]. При переводе необходимо учесть, что номинальные величины относятся к линейным.

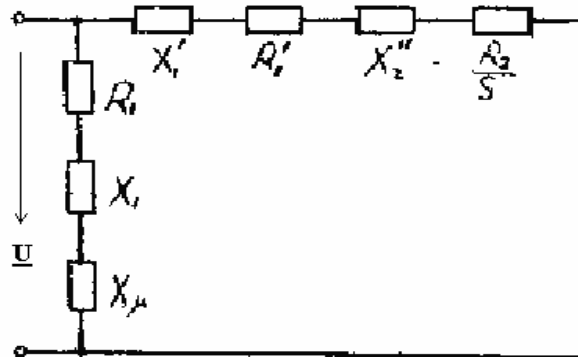


Рис. 7.2 Исходная схема замещения фазы асинхронного двигателя

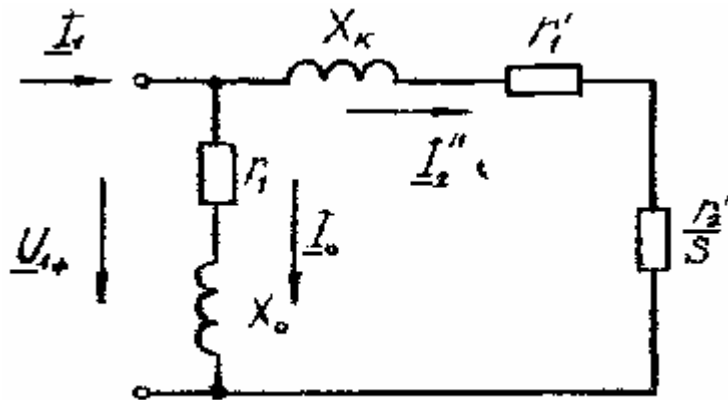


Рис. 7.3 Преобразованная схема замещения фазы асинхронного двигателя

Вначале построения круговой диаграммы (рис. 7.1) определяют масштаб тока:

$$m_i = U_{1\phi} / X_{\kappa} D_{\kappa} \text{ [A/мм]}$$

где D_{κ} - диаметр круговой диаграммы, который выбирается из удобства построения на листе заданного формата. Обычно диаметр круговой диаграммы составляет 150 - 200 мм.

Затем определяют вектор тока холостого хода I_0 :

$$\underline{I}_0 = U_{1\phi} e^{j0} / (r_1 + jx_0)$$

Построение круговой диаграммы (КД) на комплексной плоскости начинают с построения векторов $\underline{U}_{1\phi}$ и \underline{I}_0 . При этом отрезок, проведённый из начала координат в точку O в масштабе тока соответствует модулю I_0 . Масштаб для построения вектора $U_{1\phi}$ выбирается произвольно. Из точки O проводят линию параллельную мнимой оси и на ней откладывают отрезок OD равный диаметру КД. На этом диаметре строят окружность с центром в точке O_D . Далее проводят линию $x\gamma$ переменного параметра γ параллельно оси $+1$. Для удобства построения

ния масштаб сопротивлений выбирают таким, чтобы отрезок ОХ был больше диаметра КД:

$$m_r = x_k / OX$$

На линии переменного параметра откладывают отрезки ХВ, ВС.

$$XB = r_1' / m_r; BC = r_2'' / m_r.$$

После этого проводят линию моментов ОВ и линию мощности ОС.

Далее определяют масштаб мощности:

$$m_p = 3U_{1\phi} m_i$$

и масштаб моментов:

$$m_M = m_p / \omega_1$$

$$\text{где } \omega_1 = n_1 2\pi / 60, n_1 = 60f/p,$$

где f - частота сети, p - число пар полюсов обмотки статора.

По известному (ранее вычисленному) номинальному моменту определяют отрезок m_n соответствующий этому моменту:

$$M_n = M_{ном} / m_r$$

Перпендикулярно диаметру КД в любом месте внутри КД проводим линию. Отрезок m_n откладывают от линии моментов ОВ. Через m_n проводят линию nN параллельно линии моментов. Точка N на КД соответствует номинальному режиму.

Точка O дуги ON соответствует режиму холостого хода АД. Точка N соответствует номинальному режиму работы АД. Ток фазы двигателя обозначен на круговой диаграмме вектором I_{\perp} . Перпендикуляр, опущенный из конца этого вектора на вертикальную ось, в масштабе тока соответствует реактивному току, потребляемому фазой АД.

Коэффициент мощности и величина реактивного тока фазы двигателя могут быть определены опытным путём. Для этого определяют активную мощность, потребляемую двигателем из сети. Также замеряют линейные ток и напряжение на входе двигателя. Отношение активной мощности к полной мощности и определяет коэффициент мощности:

$$\chi = \cos \varphi = P / 1.71IU.$$

Величина реактивного тока фазы определяется из выражения:

$$I_p = I_{\phi} \sin \varphi$$

3. Подготовка к лабораторной работе.

В журнале лабораторных работ изобразить схему эксперимента по измерению активной и полной мощности одной фазы АД с короткозамкнутым ротором. Предполагается, что АД по отношению к каждой фазе симметричен. Заготовить таблицу опытных данных, в столбцах которой отметить измеряемые параметры: активную мощность, ток фазы, фазное напряжение, напряжение и ток генератора, число оборотов двигателя. Следующие столбцы таблицы под рубрикой «вычислено» озаглавить: коэффициент мощности, реактивный ток, коэффициент нагрузки.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе.

При допуске к лабораторной работе преподаватель проверяет заготовленную схему опыта и таблицу. Далее преподаватель отмечает особенности лабораторного стенда по испытанию АД с короткозамкнутым ротором. Схема включения измерительных приборов жёстко собрана на стенде. Студентам необходимо только скоммутировать только клеммную коробку двигателя в соответствии с выбранной схемой соединения звезда или треугольник и подключить его к стенду. В качестве нагрузки АД на стендах используется генератор постоянного тока со смешанным возбуждением при согласном включении серийной обмотки. Такой генератор позволяет иметь достаточно стабильное напряжение при различных токах нагрузки. Для определения коэффициента нагрузки двигателя ($M/M_{ном}$) номинальный момент вычислить по паспортным данным двигателя, а текущий момент нагрузки вычислить с учётом коэффициента полезного действия генератора постоянного тока, приняв его равным 0,85. Тогда мощность на валу АД будет определяться по формуле:

$$P=0.85U_r I_r.$$

Момент на валу двигателя определяется из известной формулы механики:

$$P=M\omega,$$

где угловая скорость вращения ω определяется по текущему числу оборотов двигателя.

5. Проведение эксперимента.

Включить обмотки АД по схеме треугольника и подключить его к стенду. Собрать схему генератора постоянного тока смешанного возбуждения в соответствии со схемой, изображённой на стенде. Запустить АД при пониженном напряжении и после разгона двигателя довести напряжение питания до номинального. В режиме холостого хода и частичных нагрузок записать показания измерительных приборов в соответствии с таблицей эксперимента.

6. Оформление отчёта.

Провести вычисление указанных в таблице величин. В отчёте построить график зависимости коэффициента мощности и величины реактивного тока от коэффициента нагрузки АД. Сравнить величину реактивного тока в режиме холостого хода и в режиме максимальной нагрузки.

7. Контрольные вопросы.

1. Дать определение круговой диаграммы АД.
2. Как строится круговая диаграмма АД?
2. Показать по круговой диаграмме как меняется величина реактивного тока и коэффициент мощности в зависимости от величины нагрузки двигателя.
3. Почему АД при длительной работе в режиме холостого хода желательно переключать на звезду?

8. *Рекомендуемая литература.*

1. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник /А.Э.Кравчик, М.М.Шлаф, В.И.Афонин, Е.А.Соболевская. -М; Энергоиздат, ,1962. -504 с.. ил.
2. Проектирование электрических машин; Учеб. пособие для вузов /И.П.Копылов, Ф.А.Горяинов, Б. К. Клоков и др.; Под ред. И.П.Копылова. - М.: Энергия, 1960. - 496 с., ил.
3. Вольдек А.И. Электрические машины; Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. - 3-е изд., перераб. -Л.: Энергия, 1978. - 632 с., ил.
4. Конспект лекций.
4. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях.- ГЭИ.-МЛ. 1963 г. стр 53-88.

Компенсация реактивной мощности асинхронного двигателя

1. Цель работы.

Целью настоящей лабораторной работы является экспериментальное исследование возможности компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя в режиме холостого хода и частичных нагрузок.

2. Основы теории.

На промышленных предприятиях компенсацию реактивной мощности отдельных асинхронных двигателей, как правило, не проводят. Такую компенсацию проводят в масштабе крупного цеха или целиком предприятия. В данной работе, с такой точки зрения, АД можно рассматривать как микромодель цеха или предприятия.

Величину реактивной мощности отдельного асинхронного двигателя можно вычислить по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра активной мощности или рассчитать теоретически по круговой диаграмме. По величине реактивного тока, как было показано в лабораторной работе №3, рассчитывается величина ёмкости компенсирующего конденсатора.

Обмотки статора асинхронного двигателя могут быть соединены по схеме звезда или треугольник в зависимости от напряжения сети и номинального напряжения двигателя. Компенсирующие конденсаторы также могут быть соединены по схеме звезды или треугольника вне зависимости от схемы соединения обмоток двигателя. При этом величина ёмкости компенсирующего конденсатора ветви и его рабочее напряжение зависят от схемы их соединения.

3. Подготовка к лабораторной работе.

По данным исследования асинхронного двигателя в лаб. раб. №7 вычислить величину ёмкости компенсирующего конденсатора для каждой нагрузки и занести эти значения в таблицу. При этом следует учесть, что обмотки двигателя соединены треугольником, и компенсирующие конденсаторы также соединяются по схеме треугольника. В этой таблице предусмотреть два раздела «до компенсации» (переписать данные из лаб. раб. №7) и «после компенсации». Столбцы таблицы должны содержать значения напряжения, тока, активной мощности и вычисленного значения коэффициента мощности.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе.

В начале занятия преподаватель проверяет заготовленную таблицу эксперимента с вычисленными значениями компенсирующих ёмкостей. Следует обратить внимание студентов, что значения компенсирующих ёмкостей мало отличаются в различных режимах. Поэтому, чтобы избежать сложной системы управления переключением ёмкостей, целесообразно установить одну какую-то ёмкость. Чтобы избежать перекомпенсации, необходимо установить мини-

мальную компенсирующую ёмкость. Для установки сопоставимых режимов следует ток нагрузки и напряжение генератора постоянного тока устанавливать такими же, как в лабораторной работе №7.

5. Проведение эксперимента

Собрать схему лабораторной работы №7 и включить компенсирующие ёмкости к зажимам сети. Запустить двигатель при пониженном напряжении и после разгона регулятором напряжения установить номинальное напряжение питания. Затем, устанавливая требуемую нагрузку генератора постоянного тока, записать показания приборов.

6. Оформление отчёта.

По данным результатов эксперимента для каждой нагрузки вычислить значение коэффициента мощности и занести их в таблицу. В одной системе координат построить графики зависимости коэффициента мощности от коэффициента нагрузки до и после компенсации. Сделать выводы.

7. Контрольные вопросы.

1. Сравнить по величине и рабочему напряжению схемы включения звезды и треугольника компенсирующих ёмкостей.
2. Почему нужно избегать перекомпенсации реактивной мощности?
3. Как изменяется величина реактивного тока в зависимости от величины нагрузки АД?
4. Как зависит величина компенсирующей ёмкости от мощности двигателя?

8. Рекомендуемая литература.

1. Основы теории в п.п. 2 лаб. раб. №7.№8.
2. Конспект лекций.
3. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях.- ГЭИ.-МЛ. 1963 г. стр 53-88.

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТРЕУГОЛЬНИКА НА ЗВЕЗДУ

1. Цель работы.

Рассматривается возможность уменьшения реактивного тока при переключении обмоток статора недогруженного или работающего длительно на холостом ходу асинхронного двигателя с треугольника на звезду.

2. Основы теории.

Опыт показывает, что, несмотря на весьма часто встречающуюся большую и постоянную недогрузку асинхронных двигателей, замена их во многих случаях сказывается все же затрудненной как по конструктивным соображениям (например, при двигателях, встроенных в рабочие машины, или двигателях специальных конструкций), так и по производственным соображениям (например, в связи с относительно частой переналадкой оборудования - при изменении технологического процесса, ассортимента обрабатываемых изделий и т.п.).

В случаях, когда замена значительно недогруженного асинхронного двигателя не может быть осуществлена, необходимо проверить, есть ли возможность переключения этого двигателя с треугольника на звезду.

Следует подчеркнуть, что вопрос этот далеко не является новым. Он достаточно хорошо известен широким кругам энергетиков по опыту эксплуатации асинхронных двигателей 220/380 В в силовых сетях старых конструкций имеющих напряжение 220 В.

В этих сетях переключение асинхронных двигателей с треугольника на звезду применяется с большой эффективностью уже на протяжении ряда лет.

В современных силовых сетях, имеющих напряжение 380 В, асинхронные двигатели 220/380 в могут быть использованы только при одном соединении - звезде.

При переключении асинхронных двигателей с треугольника на звезду необходимо соблюсти условия допустимого нагрева, нормального разгона, устойчивой работы.

При выявлении с точки зрения условия допустимого нагрева предельно допустимой нагрузки асинхронного двигателя, необходимо проанализировать его тепловой режим при переключении с треугольника на звезду.

Потери активной мощности в стали, пропорциональные квадрату фазного напряжения, при переключении на звезду уменьшаются в 3 раза.

Опытные данные по тепловому режиму асинхронных двигателей, переключаемых на звезду, показывают, что предельно допустимый коэффициент нагрузки может быть равен, исходя из условия допустимого нагрева, 45 - 50% номинальной мощности двигателя. Другими словами предельная мощность или момент нагрузки переключенного двигателя не должен превышать половины

его паспортной мощности или момента.

Предельно допустимый коэффициент нагрузки, исходя из условия нормального разгона, может быть выявлен из условия, что пусковой и максимальный моменты двигателя, пропорциональны квадрату фазного напряжения и уменьшаются при переключении на звезду в 3 раза..

Во всех тех случаях, когда двигатели запускаются на холостом ходу (двигатели металлорежущих станков, деревообделочных станков и т.п.), условие нормального разгона при переключении на звезду соблюдается.

В тех случаях, когда условие нормального разгона не может быть соблюдено, переключение на звезду можно осуществить посредством специального переключателя после разгона двигателя.

Следует отметить, что против автоматического переключения двигателей со звезды на треугольник имеются возражения, сводящиеся к тому, что при этих переключениях возникают большие толчки тока и явления резкого торможения двигателей.

В специальной литературе, посвященной неустановившимся режимам, имеется указание, что при внезапном подключении статорной обмотки к сети, когда ротор имеет полную скорость, возможны значительные толчки тока, превосходящие в 8 - 10 раз номинальное значение. Показывается также, что указанный толчок тока при переключении на треугольник длится в течение времени, сравнимым с периодом сетевого напряжения.

Экспериментальная проверка переходного процесса двигателя при переключении на треугольник показала, что:

с ростом активной мощности, потребляемой двигателем, увеличиваются толчок тока и степень снижения скорости в момент его переключения;

восстановление скорости вращения происходит весьма быстро;

толчок тока спадает почти мгновенно.

Переходной процесс даже в наименее благоприятном случае (при потреблении 50% номинальной мощности) не может рассматриваться как опасный для короткозамкнутых двигателей низкого напряжения.

3. Подготовка к лабораторной работе.

Изучить основы теории по п.2 настоящих методических указаний и по соответствующему разделу конспекта лекций. В журнале лабораторных работ изобразить две схемы включения обмоток статора АД. Заготовить таблицу опытных данных с двумя строками для соединений звезда и треугольник. Таблица должна содержать пять столбцов с данными: напряжение, ток, активная мощность, коэффициент мощности и значение реактивного тока.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе.

В начале занятия преподаватель проверяет заготовленные схемы включения АД и таблицу эксперимента. Следует напомнить студентам, что включение

АД при соединении его обмоток треугольником следует производить при пониженном напряжении, а также подчеркнуть что опыты проводятся только в режиме холостого хода.

5. Проведение эксперимента.

Собрать требуемую схему эксперимента. Запустить двигатель и в режиме холостого хода записать показания приборов.

6. Оформление отчёта.

Вычислить значения коэффициента мощности и реактивного тока для двух схем соединения статорных обмоток АД. Результаты занести в таблицу. Сделать выводы об эффективности переключения обмоток двигателя с треугольника на звезду.

7. Контрольные вопросы.

1. Когда возможно переключение обмоток АД с треугольника на звезду?
2. Как меняется момент двигателя при снижении напряжения питания?
3. Отметить недостатки переключения обмоток АД.

8. Рекомендуемая литература.

1. Конспект лекций.
2. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях.- ГЭИ.-МЛ. 1963 г. стр. 53-88.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В НЕДОВОЗБУЖДЁННОМ И ПЕРЕВОЗБУЖДЁННОМ РЕЖИМАХ

1. Цель работы

Целью настоящей работы является исследование синхронного двигателя в недовозбужденном и перевозбужденном режимах. На основе этих исследований устанавливается понятие, как и почему синхронный двигатель в перевозбужденном режиме для сети представляет активно-емкостную нагрузку.

2. Основы теории

Компенсирующую способность синхронного двигателя в перевозбужденном (форсированном) режиме, т.е. представлять для сети активно-емкостную нагрузку удобно показать с помощью векторной диаграммы и угловой характеристики двигателя при допущении постоянства момента на валу двигателя. Векторная диаграмма синхронного двигателя строится на основании уравнения электрического равновесия цепи якоря в установившемся режиме:

$$\underline{U} = \underline{E} + \underline{I}jx_c$$

где \underline{U} - комплекс напряжения фазы статора (сети),

\underline{E} - э.д.с. обмотки якоря

$$E = 4,44W\Phi_m n_1 p / 60 ,$$

где W - число витков фазы статора;

Φ_m - максимальное значение синусоидального в пространстве воздушного зазора магнитного потока;

n_1 - число оборотов ротора (синхронная скорость двигателя) в об/мин;

p - число пар полюсов двигателя;

I - ток якоря (ток статорной обмотки);

x_c - синхронное сопротивление обмотки статора (активное сопротивление этой обмотки значительно меньше синхронного сопротивления x_c и поэтому не учитывается).

Векторная диаграмма синхронного двигателя для небольшого тока возбуждения представлена на рисунке 10.1.

Порядок построения векторной диаграммы. Произвольно, например, вертикально, в масштабе напряжения строим вектор \underline{U} . При небольших токах возбуждения, в недовозбужденном режиме при некоторой нагрузке двигателя ток якоря \underline{I}_1 отстает от напряжения на некоторый угол φ_1 . Из конца вектора \underline{U} проведем прямую, перпендикулярную току или его направлению. На этой прямой в масштабе напряжений откладываем величину падения напряжения на синхронном сопротивлении $I_1 x_c$. Вектор проведенный из начала вектора \underline{U} в конец вектора $jI_1 x_c$ представляет собой э.д.с. обмотки якоря \underline{E}_1 .

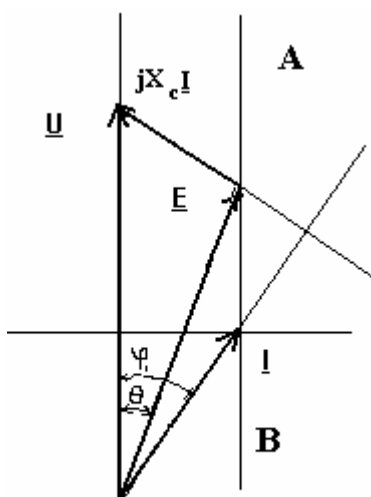


Рис.10.1. Векторная диаграмма синхронного двигателя

Уравнение угловой характеристики синхронного двигателя имеет вид

$$M = 3E \sin \theta / \omega ,$$

где M - момент на валу двигателя;

E - э.д.с. обмотки якоря;

θ - угол между векторами \underline{U} и \underline{E} ;

ω - угловая скорость ротора.

При постоянном моменте на валу двигателя мощность, потребляемая двигателем из сети так же, будет постоянной

$$P = 3UI \cos \varphi.$$

Увеличение тока возбуждения двигателя приведет к росту э.д.с. якоря. При этом в соответствии с уравнением угловой характеристики при условии постоянства момента на валу двигателя величина $E \sin \theta$ будет постоянной и вектор E будет скользить по линии AB , годографу, параллельной направлению вектора \underline{U} (рис.10.2).

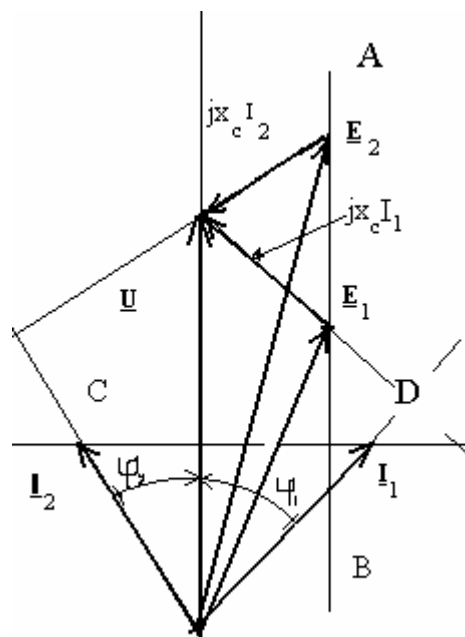


Рис. 10.2. Векторная диаграмма СД при различных токах возбуждения

Исходя из уравнения электрического равновесия цепи якоря будет меняться положение вектора $j\underline{I}X_c$. Так как вектор $j\underline{I}X_c$ перпендикулярен вектору тока \underline{I} , то направление этого тока будет также изменяться, причем при постоянстве момента на валу двигателя и, следовательно, постоянной потребляемой по сети мощности величина $I \cos \varphi$ должна оставаться

неизменной. Это следует из того, что в формуле мощности величина напряжения постоянная величина. Таким образом, конец вектора тока якоря \underline{I} при принятых условиях описывает на комплексной плоскости прямую линию СД (рис.10.2).

В перевозбужденном режиме ток якоря \underline{I} опережает напряжение фазы двигателя, \underline{U} и двигатель для сети имеет активно-емкостный характер.

Емкостная составляющая тока якоря $I \sin \varphi_2$ может быть использована для компенсации реактивной мощности других потребителей, подключенных к сети питания синхронного двигателя.

По векторной диаграмме, изображенной на рисунке 10.2 можно наблюдать, что при переходе от недовозбужденного к перевозбужденному режиму ток двигателя достигает минимума. При этом коэффициент мощности синхронного двигателя равен единице.

Все приведенные выше рассуждения можно повторить для любых других допустимых моментов двигателя, в том числе и для режима холостого хода.

Зависимости тока якоря двигателя от тока возбуждения при различных нагрузках носит название U-образных характеристик, которые представлены на рисунке 10.3.

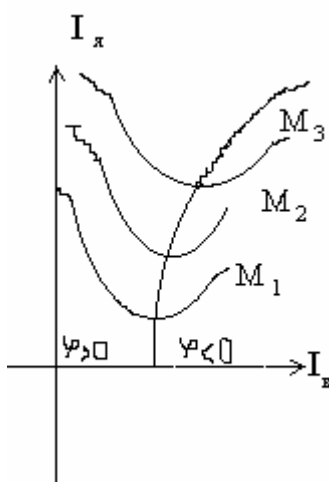


Рис.10.3. U-образные характеристики СД

3. Подготовка к лабораторной работе

Изучить основы теории изложенные в п.2.

Ознакомиться с порядком проведения эксперимента (см.п.5). Заготовить таблицу эксперимента, в столбцах которой указать - ток возбуждения, ток якоря, мощность двигателя, коэффициент мощности.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе

В начале работы преподаватель проверяет наличие заготовленной таблицы эксперимента. Затем проводится беседа по схеме стенда (рис.10.4). Уточняются назначение приборов и кратко объясняется принцип действия измерительных приборов. После этого у стенда объясняется порядок проведения опыта.

5. Проведение эксперимента

Схематическая схема стенда изображена на рисунке 10.4.

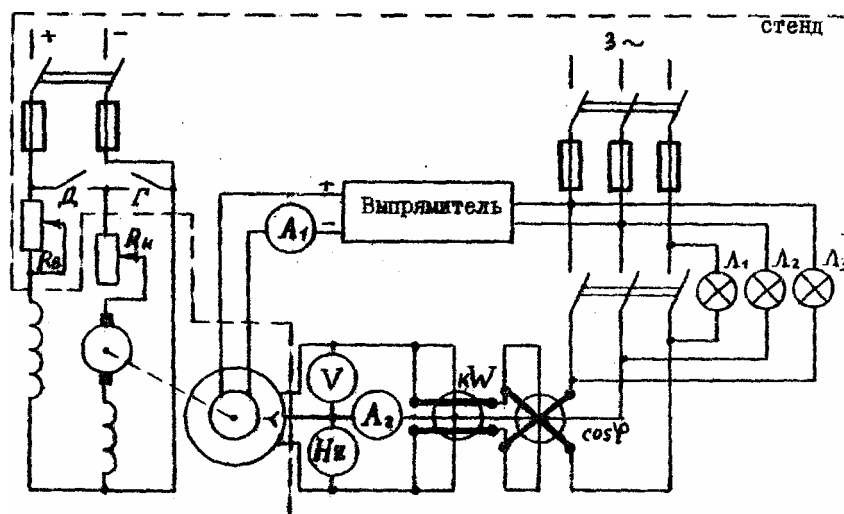


Рис.10.4. Схематическая схема стенда

Подготовить синхронную машину для параллельной работы с сетью. Для этого, изменяя ток возбуждения, довести линейное напряжение якоря до величины напряжения сети (при номинальной частоте 50 Гц). Далее обеспечить синфазность напряжений якоря и сети с помощью реостата R, включив ламповый синхроскоп. Одновременное погасание всех трех ламп соответствует совпадению по фазе напряжений якоря и сети. В этот момент

следует перевести синхронную машину в двигательный режим (нажатием кнопки "Вкл"). Кнопкой "Стоп" отключить машину постоянного тока от сети. Тем самым устанавливается режим холостого хода синхронного двигателя. Плавно изменяя ток возбуждения от минимального значения до 1,2 номинального значения, записать величины: тока возбуждения, тока якоря, мощности, коэффициента мощности. Величина тока якоря не должна превышать значение номинального тока. Результаты записать в таблицу.

Осуществить режим нагрузки синхронного двигателя. Для этого поднять ножи реостата и установить генераторный режим машины постоянного тока (нажатием кнопки "Генератор"). Далее, плавно опуская ножи реостата, довести потребляемую синхронным двигателем мощность до величины (0,3- 0,6) номинального значения. Поддерживая нагрузку постоянной, снять в том же порядке требуемые характеристики.

При значениях тока якоря, близких к номинальному, работа синхронного двигателя может оказаться неустойчивой. В этом случае следует ограничиться уже полученными данными.

6. Оформление отчета

Построить в масштабе векторные диаграммы двигателя для недовозбужденного и перевозбужденного режимов, используя данные эксперимента.

Изобразить U-образную характеристику синхронного двигателя.

7. Контрольные вопросы

1. Как запускаются синхронные двигатели?
2. Как можно регулировать реактивную мощность сети с помощью синхронного двигателя?
3. Что такое синхронный компенсатор?
4. Как регулируется реактивная мощность сети с помощью синхронного компенсатора?

8. Рекомендуемая литература

1. Конспект лекций.
2. Электротехника/ Ю.М.Борисов и др. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.- стр.472-498.

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Цель работы

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка компенсирующей способности синхронного двигателя в условиях цеха (лаборатории).

2. Основы теории

Способность синхронного двигателя работать с опережающим током при форсировании тока возбуждения (в перевозбуждённом режиме) была показана в п.2 л.р. №10. В данном разделе показаны некоторые аспекты использования синхронных двигателей для решения задачи повышения коэффициента мощности.

Компенсирующая способность синхронного двигателя, представляющая собой отношение реактивной мощности (квар), отдаваемой в сеть, к полной (номинальной) мощности (кВА), зависит как от конструктивных свойств, характеризующих номинальным коэффициентом мощности двигателя, так и от факторов эксплуатационного характера, как-то: тока возбуждения, напряжения на зажимах, нагрузки на валу.

Наибольшая компенсирующая способность двигателя при номинальной нагрузке на валу и номинальном напряжении на зажимах имеет место при номинальном токе возбуждения.

Обычно относительная нагрузка на валу у синхронных двигателей находится в пределах 50 - 100% номинальной.

Для этих пределов наибольшая компенсирующая способность двигателя при номинальном напряжении может быть оценена по выражению, выявленному в (1) на основе опытных данных:

$$q_{\text{МАКС}} \% = \left[\sin \varphi_H + (1 - \beta_{\text{с.д}}) \left(\frac{\sin \varphi_H}{48 \sin \varphi_H - 32} + 0,4 \right) \right] \cdot 100, \quad (37)$$

где $q_{\text{МАКС}} = \frac{Q_{\text{с.д}} \cdot 100}{S_{\text{н.с.д}}}$ – наибольшая компенсирующая способность,

$\beta_{\text{с.д}}$ - коэффициент нагрузки двигателя (на валу).

Компенсирующая способность синхронного двигателя резко уменьшается при токах возбуждения меньше номинальных. При уменьшении тока возбуждения всего на 20% компенсирующая способность двигателя как следует из опытных данных, приведённых в (1), например, при $\cos \varphi_H = 0,8$ и $\beta_{\text{с.д}} = 0,7$ падает на 45%.

Часто стараются облегчить тепловой режим синхронных двигателей. Это может привести к тому, что ток возбуждения у двигателей будет занижен и эффект компенсации реактивной мощности с помощью такого двигателя будет

утерян.

3. Подготовка к лабораторной работе

Изучить п.2 данной работы. Повторить материал п.2 л.р. №10. Заготовить таблицу эксперимента с двумя разделами “без синхронного двигателя” и “с синхронным двигателем”. В каждом разделе предусмотреть три столбца - напряжение сети, общий ток, активная мощность. Число строк таблицы - 3. В разделе “с синхронным двигателем” добавить столбцы - ток СД, $\cos \varphi$.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе

Перед началом обсуждения опыта преподаватель проверяет у каждого студента заготовленную таблицу эксперимента. Далее указывается, что основные потребители цеха моделируются двумя двигателями - асинхронным с КЗ ротором и асинхронным с фазным ротором, работающими одновременно. При этом исследуются три режима - режим холостого хода, режим 50%-ой нагрузки и режим номинальной нагрузки обоих двигателей. Компенсирующая способность синхронного двигателя определяется по минимуму тока на входе фидера.

5. Проведение эксперимента

Собрать схему АД с КЗ ротором с нагрузкой (генератором постоянного тока смешанного возбуждения). Собрать схему АД с фазным ротором с жидкостным пусковым реостатом. Запустить первый двигатель на пониженном напряжении и после разгона установить номинальное напряжение питания. Запустить второй двигатель с помощью пускового реостата. Снять опытные данные для указанных в п.4 трех режимов. Коэффициент нагрузки можно определять по потребляемому двигателем току или мощности.

Далее следует снять нагрузку двигателей, т.е. перевести их в режим холостого хода. Запустить синхронный двигатель в режиме без форсировки тока возбуждения. Установить один из прежних режимов асинхронных двигателей и увеличивая ток возбуждения СД добиться минимума тока на входе цепи питания двигателей. Данные занести в таблицу в раздел «с синхронным двигателем».

6. Оформление отчета

Для одного из указанных преподавателем режимов (для бригады студентов) рассчитать потребляемый цехом реактивный ток. Расчёт провести по величинам: активной мощности, току и напряжению. В отчете сделать вывод о компенсирующей способности синхронного двигателя.

7. Контрольные вопросы

1. Сравнить компенсирующую способность синхронного двигателя и косинусных конденсаторов.

2. Где целесообразно внедрять синхронные двигатели на промышленных предприятиях?

8. Рекомендуемая литература

1. Л.В.Литвак. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. ГЭИ, М.Л. - 1963.

2. Конспект лекций.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1. Цель работы

На основе осознанного смысла активной, реактивной и полной мощности, а также коэффициента мощности в цепях несинусоидального тока проводится экспериментальная проверка энергетических показателей трехфазного выпрямителя со средней точкой, работающего на двигатель постоянного тока.

2. Основы теории

В преобразовательных устройствах, например, выпрямителях, линейные токи существенно несинусоидальны. Показания измерительных приборов в таких цепях зависят от системы измерительного прибора. Например, приборы электромагнитной и электродинамической систем реагируют на действующее значение тока и напряжения, а приборы электронных систем могут проводить расчёт, например, мощности по классическому алгоритму.

Вентильные преобразователи создают в питающей системе переменные периодические токи, которые в большей или меньшей степени отличаются от синусоидальных функций времени. Из-за наличия в питающей системе сопротивлений под действием этих токов напряжения питающей системы тоже становятся несинусоидальными. Особенно значительна несинусоидальность напряжений на входах вентильных преобразователей, которые при естественной коммутации создают на время коммутации токов между вентилями междуфазные короткие замыкания на входе переменного тока преобразователя.

При коротких коммутационных замыканиях, так же как и при аварийных, напряжение между фазами, замкнутыми коммутирующими вентилями “накоротко”, становится близким к нулю и остается таким в течение всего времени коммутации. В точках питающей системы, электрически удаленных от работающего вентильного преобразователя, понижение напряжения, вызванное коммутацией (коммутационные “провалы”), уменьшается в зависимости от удаленности другого потребителя.

Разложением Эйлера-Фурье несинусоидальные периодические токи и напряжения могут быть представлены в виде конечных сумм синусоидальных функций времени основной частоты и частот, кратных основной частоте.

В зависимости от кратности p коммутационных воздействий вентильного преобразователя на сеть за период напряжения этой сети при работе вентильного преобразователя постоянного тока в напряжении питающей системы, создаются гармоники с частотами, в n раз превышающими частоту основной гармоники.

При этом $n = kp + 1$, где $k = 1, 2, \dots$ - целое положительное число.

Кратность амплитуды высшей гармоники n -го порядка I_n в токе вентилярного преобразователя к основной гармонике I_1 может быть найдена из соотношения, которое получается при пренебрежении длительности коммутации и при идеальном сглаживании выпрямленного тока:

$$I_n/I_1 = I/n$$

Предполагая, что во время коммутации токи коммутирующих вентиляей изменяются как линейные функции времени, а выпрямленный ток идеально сглажен, можно получить более точное соотношение

$$I_n/I_1 = (I/n)(2/n\gamma)\sin(n\gamma/2)$$

где γ - угол коммутации.

Энергетические показатели вентилярных преобразователей.

При передаче энергии из питающей системы вентилярному преобразователю в течение каждого периода питающей системы отношение энергии, переданной за период, к длительности этого периода, называется активной мощностью. При несинусоидальных токах и напряжениях активная мощность может быть определена как сумма произведений действующих токов, напряжений и косинусов углов отставания токов от напряжений для всех гармоник токов и напряжений, имеющих одинаковые номера n . Активная мощность многофазной системы равна сумме активных мощностей для всех фаз. При замене косинусов на синусы при $n = 1$ получается реактивная мощность.

. Активная мощность передается основной гармоникой напряжения, основной гармоникой активного тока, а также высшими гармониками активного тока вентилярного преобразователя и высшими гармониками напряжения питающей системы, которые созданы другими источниками (другими вентилярными преобразователями, дуговыми печами и др.).

Вследствие относительной малости активной мощности высших гармоник токов и напряжений принято определять активную мощность (и энергию) лишь по основным гармоникам токов и напряжений.

Основная часть падения (и колебания) напряжения создается реактивной мощностью (и ее изменением). Энергетические характеристики вентилярных преобразователей выражаются в виде реактивной мощности (абсолютной или относительной), потребляемой вентилярным преобразователем при его регулировании:

$$Q_1 = \frac{P_1}{U_d^*} \sqrt{1 - U_d^{*2}},$$

где P_1 – активная мощность основной гармоник;

$U_d^* = U_d/U_{d0}$ - относительное выпрямленное напряжение.

Полученное соотношение определяет реактивную мощность всего вентильного преобразователя и включает в себя реактивную мощность, возникающую при протекании токов преобразователя по индуктивным сопротивлениям рассеяния трансформатора.

Для уменьшения потребления реактивной мощности, особенно в относительно мощных вентильных преобразователях, работающих с переменной нагрузкой, применяют специальные схемы преобразователей: с нулевыми вентилями, с согласно-встречным управлением последовательно соединенными преобразователями, с несимметричным фазовым управлением, с искусственной коммутацией. Кроме того, применяются внешние средства компенсации реактивной мощности: синхронные компенсаторы с повышенным быстродействием и статические источники реактивной мощности.

Коэффициент мощности.

Отношение активной мощности к полной является важнейшим энергетическим показателем вентильного преобразователя и называется коэффициентом мощности χ , который характеризует использование питающей системы:

$$\chi = \frac{P_1}{S},$$

где P_1 – активная мощность основной гармоники;
 S – полная мощность.

В симметричной трехфазной питающей системе

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

где U_1 – действующее фазовое напряжение основной гармоники;

I_1 – действующий фазный ток основной гармоники;

φ_1 – угол опережения основной гармоникой напряжения основной гармоники тока;

$$S = 3U_1$$

где U_1 – действующее фазное напряжение (все гармоники),

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2};$$

U_n – действующее фазное напряжение гармоники n -го порядка,

Действующий фазный ток (все гармоники),

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2};$$

I_n – действующий фазный ток гармоники n -го порядка.

С учетом полученных выражений коэффициент мощности можно представить в виде

$$\chi = \frac{U_1}{U} \cdot \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi_1 = V_u V_I \cos \varphi_1 = V \cos \varphi_1,$$

где V_u – коэффициент искажения напряжения,

$$V_u = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}};$$

V_I – коэффициент искажения тока,

$$V_I = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}$$

V – коэффициент искажения мощности, или просто коэффициент искажения, $V = V_u V_I$

Согласно существующим нормам коэффициент искажения напряжения должен быть в пределах 0,99875 .

Это условие в первую очередь относится к тем участкам питающей системы, где неизбежно присоединение различных потребителей и в случае необходимости должны быть приняты меры уменьшения высших гармоник напряжения.

Высшие гармоники напряжения могут быть уменьшены применением резонансных фильтров в виде специальных конденсаторов, подключенных к сети через реакторы, обеспечивающие резонанс напряжений на соответствующей гармонике и малое сопротивление этой гармонике на входе преобразователя.

3. Подготовка к лабораторной работе

Изучить основы теории по п.2. Рассчитать в общем виде действующее значение несинусоидального тока в питающей сети, двухполупериодного однофазного тиристорного выпрямителя с естественной коммутацией при угле регулирования $\alpha = n \cdot 10^\circ$. Здесь n соответствует номеру студента в журнале группы. При расчёте изобразить синусоидальный и на этом же графике показать несинусоидальный ток с заданным углом регулирования. Расчёт провести по известным формулам электротехники. Желательно получить результат в общем виде в виде зависимости действующего значения тока от угла регулирования, а затем подставить в формулу заданный угол.

4. Обсуждение эксперимента и допуск к работе

В начале занятия преподаватель проверяет у каждого студента результат расчета действующего значения несинусоидального тока. Затем преподаватель обсуждает со студентами смысл активной, реактивной и полной мощности, а также понятие коэффициента мощности в цепях несинусоидального периодического тока. Следует обратить внимание студентов на особенности работы выпрямителя на двигатель постоянного тока.

5. Проведение эксперимента

Включить выпрямитель и запустить один или несколько двигателей постоянного тока (по усмотрению преподавателя). В режиме холостого хода и частичных нагрузок двигателей записать показания измерительных приборов: активной мощности, потребляемой выпрямителем из сети, линейного тока и напряжения.

6. Оформление отчета

По данным эксперимента вычислить значение коэффициента мощности для режимов холостого хода и различных нагрузок по измеренным величинам мощности, тока и напряжения.

Затем, для однофазного двухполупериодного неуправляемого выпрямителя без фильтра, работающего на активную нагрузку с заданной индивидуальной для каждого студента амплитудой тока ($A_m=10n$ А) и средним значением выпрямленного напряжения 10 вольт, вычислить теоретический коэффициент мощности. Данные по разложению тока в ряд Фурье взять из приложения 3 (3).

7. Контрольные вопросы

1. Как вычисляется действующее значение несинусоидального тока?
2. Понятие о коэффициенте мощности в цепях несинусоидального периодического тока.
3. Каким образом можно улучшить коэффициент мощности вентильных преобразователей?

8. Рекомендуемая литература

1. Конспект лекций.
2. Литвак Л.В. рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. – ГЭИ. МЛ.-1963. - 252 с. ил.
3. Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Г.В.Зевеке и др.-5-изд., перераб.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-528 с.: ил.