

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ, НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Рассматриваются задачи, решения которых дают определенные ответы на вопрос как можно улучшить качества электроэнергии и создать благоприятные предпосылки на создание новых техники и технологии производственных процессов, уменьшающие потери электроэнергии в электроэнергетической системе.*

*Ключевые слова: электромагнит, электроэнергетика, электроснабжения, ток, напряжения, энерго обмен.*

## **ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY, NON-SINUSOIDAL REGIMES IN THE POWER SUPPLY SYSTEM**

*The tasks are considered, the solutions of which give definite answers to the question of how to improve the quality of electric power and create favorable prerequisites for the creation of new techniques and technologies of production processes that reduce power losses in the electric power system.*

*Key words: electromagnet, electric power, electricity, current, voltage, energy exchange.*

Электрическая энергия является продукцией электроэнергетических систем. К ее качеству предъявляются такие же требования, которые предъявляются к качеству любой промышленной продукции.

Следует различать показатели качества электроэнергии, обусловленные питающей электроэнергетической системой и приемниками электрической энергии. Так, например, отклонение частоты зависит от питающей системы; колебания частоты, несинусоидальность формы кривой напряжения, колебания напряжения, несимметрия напряжений.

Раньше считалось, что на промышленных предприятиях в сетях трехфазного тока напряжения должна составлять практически симметричную систему и должны изменяться практически синусоидально во времени. В действительности положение резко изменилось в связи с широким применением приемников электрической энергии обладающих неблагоприятными с точки зрения работы системы электроснабжения характеристиками. К таким приемникам относятся: вентиляльные преобразователи, установки однофазной и трехфазной электросварки, мощные электротермические установки, а также силовые трансформаторы

Во многих электрических сетях и системах вентиляльные преобразователи являются одним из основных видов нагрузки. Преобразователь является для сети нелинейной нагрузкой, и его работа оказывает влияние на режимы работы сети, особенно если мощности преобразователя и сети соизмеримы. Поэтому при проектировании как электрических сетей, так и вентиляльных преобразователей необходимо учитывать влияние преобразователей на питающую сеть. Только в этом случае создаются установки с высокими технико-экономическими показателями. Данный вопрос привлекает большое внимание как специалистов в области электроэнергетики и электротехники, так и разработчиков преобразовательных устройств и требует их совместной работы.

В общем, виде вентиляльный преобразователь как нагрузки сети может быть охарактеризован

коэффициентом мощности:

$$X=P/S, \quad (1.1)$$

где  $P$ -активная мощность, потребляемая преобразователем из сети;

$S=U_1 I_1$  – кажущаяся или полная мощность, потребляемая из сети;

$U_1$  и  $I_1$  - действующее значение напряжения сети и потребляемого тока.

*Активная мощность*  $P=P_H+P_{\Pi}$ , где  $P_H$  – активная мощность нагрузки, характеризующая полезный эффект преобразования энергии;  $P_{\Pi}$ - мощность потерь в преобразователе. Иначе можно записать  $P=P_H/\eta$ , где  $\eta$ - КПД преобразователя. Поскольку КПД преобразователя обычно высок,  $P \approx P_H$ .

*Кажущаяся мощность (полная мощность)*  $S$  определяется действующими значениями напряжения и тока в питающей сети. Высокие значения  $S$  требуют увеличения установленной мощности сети, в том числе трансформаторного оборудования, увеличения сечения проводов, повышения прочности изоляции. Поэтому при создании вентильных преобразователей ставится задача повышения их коэффициента мощности в пределе до значения  $\chi=1$ .

Все сказанное выше относится не только к вентильным преобразователям, но и к любым другим нагрузочным элементам электрических сетей. Для выявления особенностей вентильных преобразователей как нелинейной нагрузки сети сопоставим процессы энергообмена нагрузки сети для линейных нагрузок и вентильных преобразователей.

При работе на активную линейную нагрузку (рис 1.1, а) ток  $i_1$  и напряжение  $u_1$  синфазно, их полярность совпадает в любой момент времени и энергия постоянно передается из сети в нагрузку (рис.1.1,б). Кривая мгновенной мощности  $P = U_1 I_1$  (рис.1.1,в) однополярная.

Активная мощность по определению, известному из курса ТОЭ,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_1 i_1 dt, \quad (1.2)$$

Где  $T$ - период повторения, следовательно,

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_1 \cdot \sin \theta \sqrt{2}I_1 \sin \theta d\theta = U_1 I_1,$$

Таким образом,  $P=S$ , а коэффициент мощности  $\chi = 1$ .

Рис. 1.1 Схема и кривые тока, напряжения и мгновенной мощности при работе источника (сети) переменного напряжения на активную нагрузку.

При работе на активно-индуктивную нагрузку (рис. 2.1,а) в кривых напряжения  $u_1$  и тока  $i_1$  (рис.2.1,б) можно выделить интервалы  $t_2-t_3$  и  $t_4-t_5$ , когда полярность напряжения и тока совпадают, энергия передается из сети в нагрузку, значения мгновенной мощности  $P = u_1 \cdot i_1$  (рис.2.1,в) на этих интервалах положительны. На интервалах  $t_1-t_2$  и  $t_3-t_4$  полярности напряжения и тока противоположны, нагрузка возвращает энергию в сеть, значения мгновенной мощности на этих интервалах отрицательны (рис.2.1,в).

Активную мощность можно определить по выражению (1.2) при подстановке  $U_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \theta$  и  $i_1 = \sqrt{2}i_1 \sin(\theta - \varphi)$ , где угол  $\varphi = \text{arctg}(\omega L / R)$ .

Для уяснения физических процессов рассмотрим эту операцию подробнее, для этого представим ток  $i_1$  в виде суммы двух составляющих: тока  $i_{1,0}$ , синфазного напряжения  $u_1$ , и тока, отстающего от напряжения  $u_1$  на угол  $\pi / 2$   $i_{1,\pi/2}$  (рис.2.1,г):

$$i_1 = i_{1,0} + i_{1,\pi/2} = \sqrt{2}I_1 \cos \varphi \sin \theta + \sqrt{2}I_1 \sin \varphi \sin(\theta - \pi / 2).$$

Кривая мгновенная мощность  $p = u_1 i_1$  также может быть представлена в виде суммы

(1.3)

Кривые  $P$  и  $i_1$  приведены на рис. 2.1, д и е.  
Найдем активную мощность по (1.2) с учетом (1.3):

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_1 i_1 d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_1 \sin \theta \sqrt{2} I_1 \cos \varphi \sin \theta d\theta + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_1 \sin \theta \sqrt{2} I_1 \sin \varphi \sin(\theta - \frac{\pi}{2}) d\theta$$

Рис.2.1. Схема и кривые тока, напряжения и мгновенной мощности при работе источника (сети) переменного напряжения на активно-индуктивную нагрузку

Результат интегрирования второго слагаемого равен нулю, так как кривая  $P_{\pi/2}$  не имеет постоянной составляющей и характеризуется бесполезной обмен энергией между сетью и нагрузкой. Таким образом,

$$P = \int_0^{\pi} u_1 i_{1,0} d\theta = U_1 I_1 \cos \varphi$$

т.е. передача в нагрузку активной мощности обусловлена только синфазной составляющей тока . В соответствии с (1.1)

(1.4)

Нагрузка потребляет от сети не только активную, но реактивную мощность:

Рассмотрим теперь работу сети на нелинейную нагрузку.

Несинусоидальные кривые токов можно рассматривать как сложные гармонические колебания, состоящие из совокупности простых гармонических колебаний различных частот

На рис. 3.1,а показано подключение к сети неуправляемого однофазного выпрямителя с RL-нагрузкой. Полагаем, что индуктивность в цепи нагрузки выпрямителя велика, пренебрегаем коммутационными процессами в вентильном комплекте.

На рис. 3.1, б показаны кривые напряжения сети  $u_1$  и потребляемого выпрямителем тока  $i_1$ , имеющего форму разно-полярных прямоугольных импульсов. Для нахождения активной мощности в этой схеме достаточно воспользоваться выражением (1.2).

Рис. 3.1. Схема и кривые тока, напряжения и мгновенной мощности при работе источника (сети) переменного напряжения на неуправляемый выпрямитель.

Однако для рассмотрения физических процессов энергообмена между сетью и нагрузкой учитывая, что периодическая функция изменения несинусоидальных токов удовлетворяет условию Дирихле(ограниченная, кусочно-непрерывная, на протяжении периода имеет конечное число экстремальных значений), то периодическую функцию изменения несинусоидальных токов можно разложить в ряд Фурье

где  $v$ -номер гармоники;  $a_v, b_v$  –коэффициенты ряда Фурье;  $n$ -номер последней из учитываемых гармоник

на основании вышеизложенного представим ток в виде разложения в ряд Фурье:

$$i_1 = i_{1,1} + i_{1,3} + i_{1,5} + \dots = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \sqrt{2} I_k \sin k\theta, \quad (1.5)$$

где  $i_{1,k}$  - действующее значение  $k$ -й гармоники тока  $i_1$ .

На рис. 3.1, в показана 1-я гармоника тока, потребляемого выпрямителем из сети,  $i_{1,\epsilon}$  а на рис.

3.1,  $\gamma$ -сумма высших гармонических составляющих того же тока  $i_{1,\epsilon} = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} i_{1,k}$ , кривая мгновенной мощности также может быть разделена на два слагаемых:

$$p = u_1 i_1 = u_1 i_{1,1} + u_1 i_{1,\gamma} = P_1 + P_0$$

Указанные составляющие кривой мгновенной мощности представлены на рис.3.1,  $d$  и  $e$

Найдем активную мощность по (1.2), учитывая (1.5):

$$p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_1 i_1 d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_1 \sin \theta \sqrt{2} I_{1,1} \sin \theta d\theta + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_1 \sin \theta \left( \sum_{k=1,3,5}^{\infty} i_{1,k} \sin k\theta \right) d\theta.$$

Результат интегрирования второго слагаемого равен нулю, так как кривая  $P_0$  не имеет постоянной составляющей и также характеризует бесполезный обмен энергией между сетью и нагрузкой. Таким образом

$$p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_1 I_1 d\theta = v U_1 I_1,$$

где  $v = \frac{I_{1,1}}{I_1}$  - отношение действующего значения 1-й гармоники тока  $I_{1,1}$  к действующему значению тока  $I_1$  называется *коэффициентом искажения* тока  $i_1$ .

Коэффициент мощности неуправляемого выпрямителя в соотношении с (1.1)

$$\chi = \frac{v U_1 I_1}{U_1 I_1} = v. \quad (1.6)$$

таким образом, передача в нагрузку активной мощности обусловлена только 1-й гармоникой тока  $I_{1,1}$ , высшие гармонические составляющие вызывает лишь бесполезный обмен энергией между сетью и нагрузкой. Кажущаяся мощность при работе сети на управляемый выпрямитель может быть представлена в виде

Где  $P_0$  - МОЩНОСТЬ ИСКАЖЕНИЯ.

Так же как и реактивная мощность, мощность искажения вызывает снижение нежелательные результаты этого снижения были перечислены выше. Кроме того, при работе преобразователя от сети соизмеримой мощности возникают дополнительные отрицательные эффект, вызванные

искажением тока, потребляемого вентиляными преобразователями. Несинусоидальные токи преобразователей создают на внутреннем сопротивлении сети ограниченной мощности несинусоидальное падение напряжения, вызывая искажение кривой питающего напряжения.

Литература:

1. А.А Федоров, В.В. Каменова. Основы электроснабжения промышленных предприятий.- М: Энергоатомиздат, 1984.
  2. Г.Н.Горбачев, Е.Е.Чаплыгин. Промышленная электроника.-М: Энергоатомиздат, 1988.
  3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. -М: Высшая школа, 1984.
  4. Пискунов Н.С. Дифференциальные и интегральные исчисления- М: Наука 1985.
  5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций- М: Энергия, 1976.
-