Трехфазные электрические цепи

Теоретическое занятие

Специальность: 25.02.06 Производство и обслуживание авиационной техники

ОП.03 Электротехника и электронная техника

Тема 1.6 Трехфазные электрические цепи

Преподаватель: Рутенко А.В.

2023

Трехфазные электрические цепи

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Отметим, что обычно эти ЭДС, в первую очередь в силовой энергетике, синусоидальны. Однако, в современных электромеханических системах, где для управления исполнительными двигателями используются преобразователи частоты, система напряжений в общем случае является несинусоидальной. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют фазой, т.е. фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два различных значения:

- фаза как аргумент синусоидально изменяющейся величины;
- фаза как составная часть многофазной электрической системы.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г. Феррарис и Н. Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система, основные преимущества которой будут рассмотрены далее. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О. Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

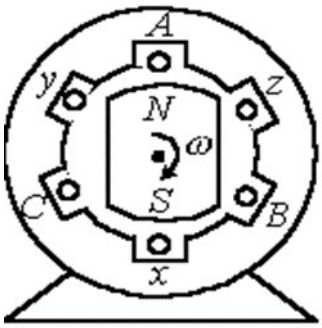


Рисунок 1. Стартер трехфазного генератора

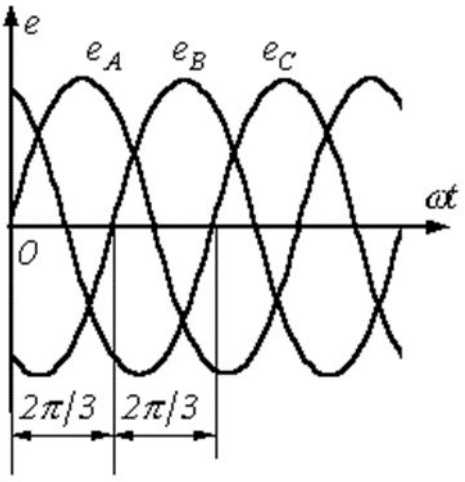


Рисунок 2. Амплитуды, отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе

Источником трехфазного напряжения является трехфазный генератор, на статоре которого (рис. 1) размещена трехфазная обмотка. Фазы этой обмотки располагаются таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на эл. рад. На рис. 1 каждая фаза статора условно показана в виде одного витка. Начала обмоток принято обозначать заглавными буквами A, B, C, а концы- соответственно прописными x, y, z. ЭДС в неподвижных обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения вращающегося ротора (на рис. 1 ротор условно изображен в виде постоянного магнита, что используется на практике при относительно небольших мощностях). При вращении ротора

с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе на рад. (рис. 2).

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Для рассмотрения важнейшего свойства уравновешенности трехфазной системы, которое будет доказано далее, введем понятие симметрии многофазной системы.

Система ЭДС (напряжений, токов и т.д.) называется симметричной, если она состоит из m одинаковых по модулю векторов ЭДС (напряжений, токов и т.д.), сдвинутых по фазе друг относительно друга на одинаковый угол. В частности, векторная диаграмма для симметричной системы ЭДС, соответствующей трехфазной системе синусоид на рис. 2, представлена на рис. 3.

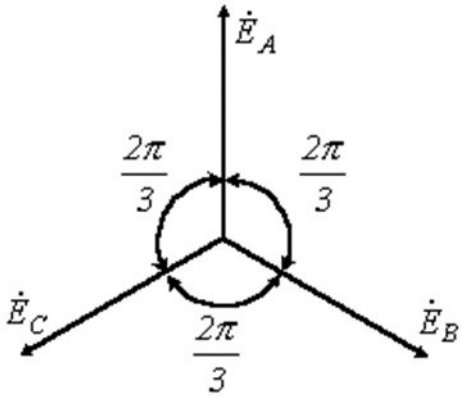


Рисунок 3. Векторная диаграмма для симметричной системы ЭДС, соответствующей трехфазной системе синусоид

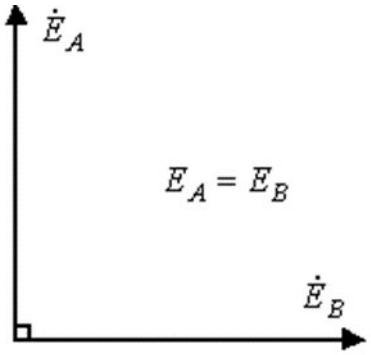


Рисунок 4. Двухфазная система с 90-градусным сдвигом

Из несимметричных систем наибольший практический интерес представляет двухфазная система с 90-градусным сдвигом фаз (см. рис. 4).

Все симметричные трех- и m-фазные (m>3) системы, а также двухфазная система являются уравновешенными. Это означает, что хотя в отдельных фазах мгновенная мощность пульсирует (см. рис. 5 а), изменяя за время одного периода не только величину, но в общем случае и знак, суммарная мгновенная мощность всех фаз остается величиной постоянной в течение всего периода синусоидальной ЭДС (см. рис. 5 б).

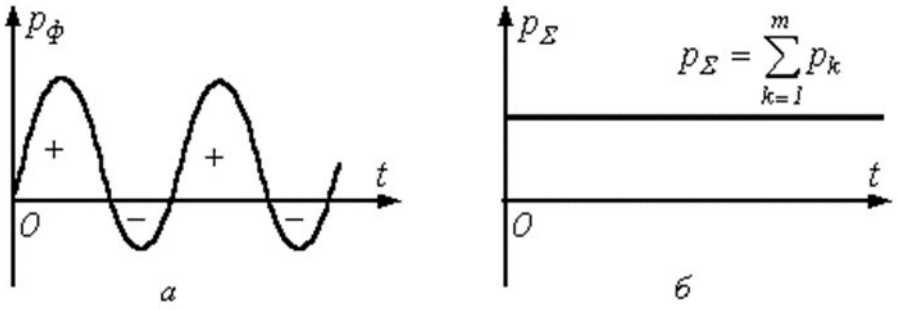


Рисунок 5. Двухфазная система

Уравновешенность имеет важнейшее практическое значение. Если бы суммарная мгновенная мощность пульсировала, то на валу между турбиной и генератором действовал бы пульсирующий момент. Такая переменная механическая нагрузка вредно отражалась бы на энергогенерирующей установке, сокращая срок ее службы. Эти же соображения относятся и к многофазным электродвигателям.

Если симметрия нарушается (двухфазная система Тесла в силу своей специфики в расчет не принимается), то нарушается и уравновешенность. Поэтому в энергетике строго следят за тем, чтобы нагрузка генератора оставалась симметричной.

Схемы соединения трехфазных систем

Трехфазный генератор (трансформатор) имеет три выходные обмотки, одинаковые по числу витков, но развивающие ЭДС, сдвинутые по фазе на 1200. Можно было бы использовать систему, в которой фазы обмотки генератора не были бы гальванически соединены друг с другом. Это так называемая несвязная система. В этом случае каждую фазу генератора необходимо соединять с приемником двумя проводами, т.е. будет иметь место шестипроводная линия, что неэкономично. В этой связи подобные системы не получили широкого применения на практике.

Для уменьшения количества проводов в линии фазы генератора гальванически связывают между собой. Различают два вида соединений: в звезду и в треугольник.

В свою очередь при соединении в звезду система может быть трех- и четырехпроводной.

Соединение в звезду

На рис. 6 приведена трехфазная система при соединении фаз генератора и нагрузки в звезду. Здесь провода АА’, ВВ’ и СС’ – линейные провода.

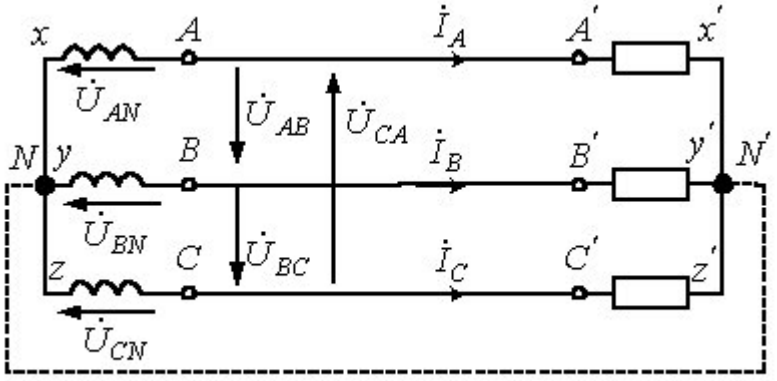


Рисунок 6. Трехфазная система

Линейным называется провод, соединяющий начала фаз обмотки генератора и приемника. Точка, в которой концы фаз соединяются в общий узел, называется нейтральной (на рис. 6 N и N’ – соответственно нейтральные точки генератора и нагрузки).

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется нейтральным (на рис. 6 показан пунктиром). Трехфазная система при соединении в звезду без нейтрального провода называется трехпроводной, с нейтральным проводом – четырехпроводной.

Все величины, относящиеся к фазам, носят название фазных переменных, к линии – линейных. Как видно из схемы на рис. 6, при соединении в звезду линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ равны соответствующим фазным токам. При наличии нейтрального провода ток в нейтральном проводе $\dot{I}_{N'N} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$. Если система фазных токов симметрична, то $\dot{I}_{N'N} = 0$. Следовательно, если бы симметрия токов была гарантирована, то нейтральный провод был бы не нужен. Как будет показано далее,

нейтральный провод обеспечивает поддержание симметрии напряжений на нагрузке при не симметрии самой нагрузки.

Поскольку напряжение на источнике противоположно направлению его ЭДС, фазные напряжения генератора (см. рис. 6) действуют от точек A, B и C к нейтральной точке N; $U_{A'N'}, U_{B'N'}, U_{C'N'}$ фазные напряжения нагрузки.

Линейные напряжения действуют между линейными проводами. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для линейных напряжений можно записать:

$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}$; (1);

$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}$; (2);

$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}$. (3).

Отметим, что всегда $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ - как сумма напряжений по замкнутому контуру.

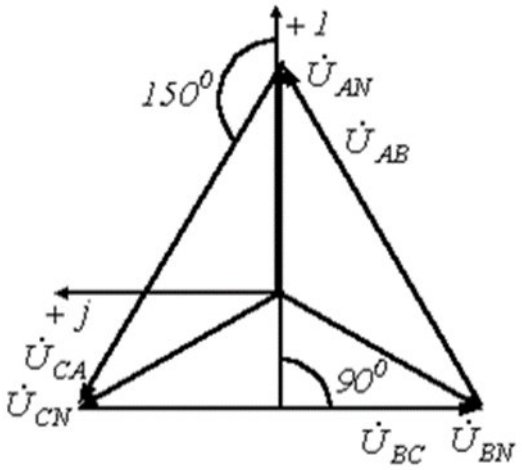


Рисунок 7. Векторная диаграмма для симметричной системы напряжений

На рис. 7 представлена векторная диаграмма для симметричной системы напряжений. Как показывает ее анализ (лучи фазных напряжений образуют стороны равнобедренных треугольников с углами при основании, равными 300), в этом случае $U_л = \sqrt{3}U_ф$ (4).

Обычно при расчетах принимается $\dot{U}_{AN} = U_{\Phi} e^{j0} = U_{\Phi}$. Тогда для случая прямого чередования фаз $\dot{U}_{CN} = U_{\Phi} e^{-j240^0} = U_{\Phi} e^{j120^0}$, (при обратном чередовании фаз фазовые сдвиги у $\dot{U}_{BN}$ и $\dot{U}_{CN}$ меняются местами). С учетом этого на основании соотношений (1)…(3) могут быть определены комплексы линейных напряжений. Однако при симметрии напряжений эти величины легко определяются непосредственно из векторной диаграммы на рис. 7. Направляя вещественную ось системы координат по вектору $\dot{U}_{AN}$ (его начальная фаза равна нулю), отсчитываем фазовые сдвиги линейных напряжений по отношению к этой оси, а их модули определяем в соответствии с (4). Так для линейных напряжений $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$ получаем: $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3} U_{\Phi} e^{-j90^0}$; $\dot{U}_{CA} = \sqrt{3} U_{\Phi} e^{j150^0}$.

Соединение в треугольник

В связи с тем, что значительная часть приемников, включаемых в трехфазные цепи, бывает несимметричной, очень важно на практике, например, в схемах с осветительными приборами, обеспечивать независимость режимов работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной, подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника в треугольник. Но в треугольник также можно соединить и фазы генератора (см. рис. 8).

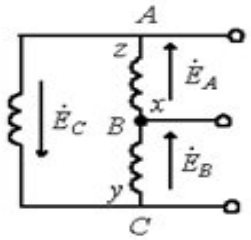


Рисунок 8. Фазы генератора

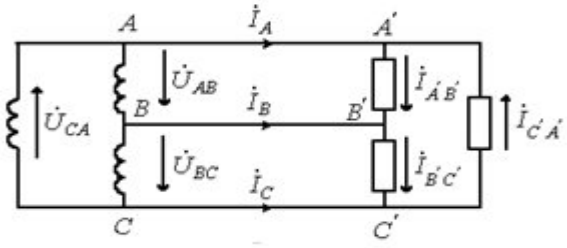


Рисунок 9. Схема соединения фаз генератора и приемника в треугольник

Для симметричной системы ЭДС имеем:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Таким образом, при отсутствии нагрузки в фазах генератора в схеме на рис.8 токи будут равны нулю. Однако, если поменять местами начало и конец любой из фаз, то $\sum \dot{E} \neq 0$ и в треугольнике будет протекать ток короткого замыкания. Следовательно, для треугольника нужно строго соблюдать порядок соединения фаз: начало одной фазы соединяется с концом другой. Схема соединения фаз генератора и приемника в треугольник представлена на рис. 9.

Очевидно, что при соединении в треугольник линейные напряжения равны соответствующим фазным. По первому закону Кирхгофа связь между линейными и фазными токами приемника определяется соотношениями:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'};$$
$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'};$$
$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}.$$

Аналогично можно выразить линейные токи через фазные токи генератора.

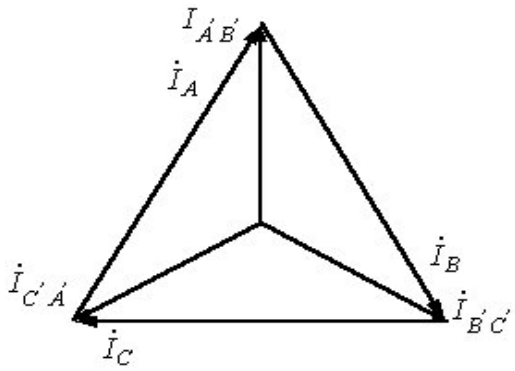


Рисунок 10. Векторная диаграмма симметричной системы линейных и фазных токов

На рис. 10 представлена векторная диаграмма симметричной системы линейных и фазных токов. Ее анализ показывает, что при симметрии токов

$I_л = \sqrt{3} I_Ф$ (5).

В заключение отметим, что помимо рассмотренных соединений «звезда – звезда» и «треугольник - треугольник» на практике также применяются схемы «звезда - треугольник» и «треугольник - звезда»[1].

[1] Острецов В.Н., Палицын А.В. Электропривод и электрооборудование: учебник и практикум для СПО — М.: Издательство Юрайт, 2022.

Список использованной литературы

1. Острецов В.Н., Палицын А.В. Электропривод и электрооборудование: учебник и практикум для СПО – М.: Издательство Юрайт, 2022. – 212 с.

2. Сибикин Ю.Д. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий: учебник. – М.: Академия, 2020. – 208 с.

3. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования: справочник. – Изд-во НЦ ЭНАС, 2017. – 504 с.