

§ 85. Трехфазный ток. Синхронные и асинхронные моторы

Представим себе генератор переменного тока, но не с двумя катушками на статоре, а с тремя, сдвинутыми на 120° одна относительно другой по окружности статора (рис. 357). При вращении ротора полюсы его будут последовательно проходить мимо каждой катушки, возбуждая в них переменные электродвижущие силы.

При этом электродвижущая сила катушки 2 отстает от электродвижущей силы катушки 1 на 120° , электродвижущая сила катушки 3 отстает на 240° . В самом деле, одинаковое значение электродвижущей силы наступает в катушке 2 на одну треть оборота позднее, чем в катушке 1, а в катушке 3 — на две трети оборота позднее:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= \mathcal{E}_0 \sin \omega t, \\ \mathcal{E}_2 &= \mathcal{E}_0 \sin (\omega t - 120^\circ), \\ \mathcal{E}_3 &= \mathcal{E}_0 \sin (\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Соединим теперь начала катушек вместе (рис. 358). Тогда линия, идущая от генератора, будет иметь четыре провода: один общий для всех катушек, так называемый «нулевой» провод, и три «фазовых» провода.

Нагрузим теперь генератор, включив три равных нагрузочных сопротивления между каждым из фазовых проводов и нулевым. В каждой катушке мы получим ток, совпадающий по фазе с электродвижущей силой:

$$I_1 = I_0 \sin \omega t, \quad I_2 = I_0 \sin (\omega t - 120^\circ), \quad I_3 = I_0 \sin (\omega t - 240^\circ).$$

В нулевом проводе должен течь ток, равный сумме всех трех токов:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = I_0 \sin \omega t + I_0 \sin (\omega t - 120^\circ) + I_0 \sin (\omega t - 240^\circ).$$

Путем несложных тригонометрических преобразований можно показать, что ток в нулевом проводе равен нулю. Еще проще можно убедиться в этом, построив

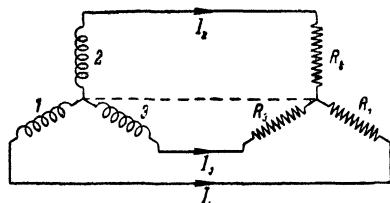


Рис. 358. Соединение звездой.

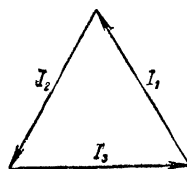


Рис. 359. Сложение токов в нулевом проводе

векторную диаграмму; три равных тока (рис. 359), сдвинутых на 120° один относительно другого, составляют замкнутый треугольник, следовательно, результирующий ток, изображаемый их геометрической суммой, равен нулю.

Это весьма существенно; мы можем просто устрани́ть нулевой провод. Линия электропередачи, идущая от трехфазного генератора имеет только три провода (фазовые провода).

Необходимо отметить, что ток в нулевом проводе равен нулю только при одинаковой, или, как говорят иначе, при симметричной нагрузке фаз. При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не был бы равен нулю. Однако обычно этим пренебрегают, так как это вызывает при отсутствии нулевого провода только некоторое перераспределение нагрузок между отдельными фазами.

То соединение катушек генератора и нагрузочных сопротивлений, которое было рассмотрено выше, носит обычно название *соединения звездой*. При этом «линейный ток», т. е. ток в проводе линии, очевидно, равен току в катушке фазы, напряжение же между двумя проводниками трехфазной линии, «линейное напряжение», не равно напряжению, развиваемому катушкой; оно представляет собой разность электродвижущих сил двух катушек, разность «фазовых напряжений».

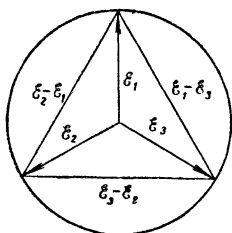


Рис. 360.

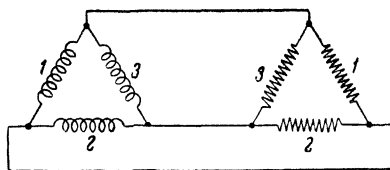


Рис. 361. Соединение треугольником.

Посредством векторной диаграммы (рис. 360) нетрудно установить, что линейное напряжение в $\sqrt{3}$ (следовательно, в 1,73) раз больше фазового.

Кроме соединения «звездой» применяют также *соединение «треугольником»* (рис. 361). Здесь начало каждой катушки соединяется с концом следующей, аналогично соединяются сопротивления нагрузки. В этом случае фазовое напряжение равно линейному, линейный же ток больше фазового, потому что он составляется из фазовых токов двух соседних катушек. Подобно предыдущему можно показать, что при соединении «треугольником» линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазового. Каждый способ соединения имеет свою область применения; соединение «треугольником» чаще всего применяется для бытовой нагрузки (для освещения и т. д.).

Трехфазная система позволяет получить *вращающийся магнитный поток*. Обратимся вновь к схематическому изображению трехфазного генератора (рис. 357). Не соединяя его ось с двигателем, приключим три катушки статора к трехфазной линии переменного тока. Если катушек 1, 2 и 3 создадут три магнитных потока, синусоидально изменяющихся со временем и отстающих по фазе относительно друг друга на 120° . Каков будет суммарный поток, получающийся в полости статора?

Можно простым геометрическим сложением показать, что суммарный поток, оставаясь постоянным по величине, будет вращаться совершенно так же, как вращался поток, создаваемый электромагнитами ротора. Для нашего случая трех катушек он будет делать 3000 об/мин. На рис. 362 дано построение суммарного поля для четырех последовательных моментов времени.

Этот результат очень важен. Он именно и определяет огромные преимущества трехфазной системы.

Поместим внутрь статора ротор, совершенно подобный ротору трехфазного генератора (см. рис. 357). Пусть ротор делает те же 3000 об/мин., что и вращающееся поле статора; полюсы ротора будут следовать за вращающимся полем

статора, мы получим обращенный трехфазный генератор, называемый обычно *синхронным мотором*. Это название происходит от греческого *συν*—вместе и

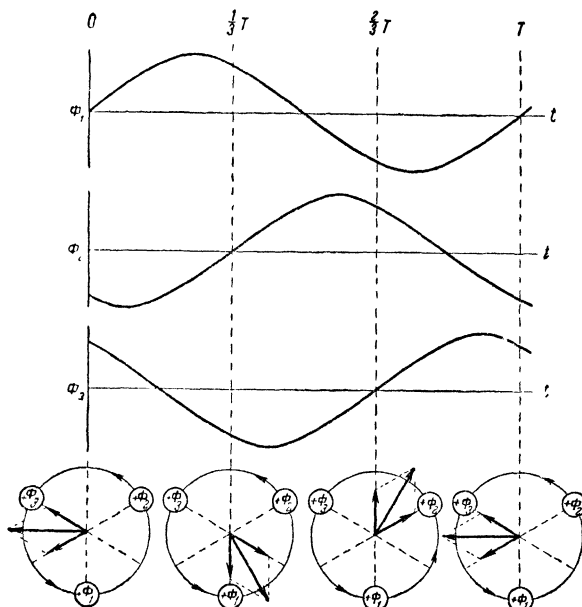


Рис. 362. Построение суммарного поля катушек трехфазного генератора

συνονος—время; оно оправдывается тем, что ротор и вращающееся поле делают строго одно и то же число оборотов—они вращаются «синхронно». При нагрузке ротор только отстает на определенный угол от потока статора, но число оборотов не изменяется. Однако при дальнейшем увеличении механической нагрузки мотор наступает момент, когда нагрузка пересиливает взаимодействие полюсов ротора с полюсами статора, синхронизм нарушается и «выпавший из синхронизма» мотор останавливается. Это же обстоятельство заставляет при пуске синхронного мотора предварительно доводить его до числа оборотов, равного синхронному; по достижении синхронного числа оборотов ротор продолжает вращаться вместе с потоком статора.

Указанная необходимость «разворачивания» синхронного мотора при пуске делает его применение во многих случаях неудобным.

Рис 363. Схема асинхронного электродвигателя.

На рис. 363 показана схема *асинхронного мотора*. Ротор асинхронного мотора имеет *полюсные катушки, замкнутые накоротко*. Катушки статора при

включении мотора в трехфазную сеть создают вращающийся магнитный поток; пересекая проводники катушек ротора, он возбуждает в них переменный ток.

Направление этих токов согласно закону Ленца таково, что возникающие потоки стремятся воспрепятствовать движению потока статора относительно ротора. Так как поток статора вращается с постоянной, зависящей лишь от частоты сети скоростью, то начинает вращаться ротор, стремясь приобрести угловую скорость, равную скорости вращающегося поля. При полном отсутствии механической нагрузки ротор достигает синхронного числа оборотов, при этом вращающийся поток и ротор неподвижны один относительно другого и индуцируемые в катушках ротора токи равны нулю.

Нагрузим теперь ротор, хотя бы затормозив его. Как только число оборотов его станет меньше числа оборотов вращающегося поля, в катушках ротора вновь возникнет ток, величина и частота которого определяются скоростью поля относительно ротора. Взаимодействие этих токов с полем статора создает вращающий момент двигателя, позволяющий ему преодолевать тормозящий момент, т. е. совершать механическую работу. Таким образом, ротор асинхронного мотора как бы «скользит» относительно поля статора; это «скольжение» тем больше, чем больше нагрузка. Обычно оно составляет при номинальной мощности, отдаваемой на валу, около 3% от синхронного числа оборотов.

Трехфазный ток был впервые реализован выдающимся русским инженером Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским в 1890 г. Им же были построены первые генераторы трехфазного тока, первая в мире линия электропередачи трехфазного тока (протяженностью 175 км на 25 000 в) и первые асинхронные моторы.

Теория переменных токов определяет, как нужно проектировать электросеть, чтобы в каждой ветви была обеспечена мощность, необходимая для потребителей тока, и чтобы при этом итоговый $\cos \varphi$ электросети был возможно более близок к единице. Включение в сеть большого числа асинхронных моторов существенно ухудшает $\cos \varphi$ цепи. Даже при холостом ходе асинхронный мотор потребляет от сети ток, необходимый для поддержания магнитного потока, и поэтому создает непродуцируемую реактивную нагрузку сети. При нормальной нагрузке $\cos \varphi$ асинхронного мотора обычно не превышает 0,8. Для улучшения коэффициента мощности электросетей разработан ряд способов; устройства, служащие для этой цели, называют *компенсаторами сдвига фаз*.

Между проводами длинных линий электропередач и землей создаются емкостные токи. Чтобы разгрузить генераторы и трансформаторы от этих токов, их компенсируют, подключая в некоторых точках линии мощные индуктивные катушки. При объединении крупных электростанций в общую электроэнергетическую систему возникает еще ряд серьезных трудностей, связанных с необходимостью постоянно поддерживать точную согласованность в работе станций на



Михаил Осипович
Доливо-Добровольский
(1862—1919).

одной и той же частоте тока при определенном соотношении фаз напряжения. Чтобы уменьшить омические потери в длинных линиях передачи, переменный ток, получаемый в генераторах при напряжении 10—15 кВ, трансформируют в ток значительно более высокого напряжения. В предыдущие десятилетия для линий длиной 200—300 км ограничивались трансформацией тока до напряжения 220 тыс. в. В одной из крупнейших в мире линий электропередачи Куйбышев—Москва (900 км) впервые было применено напряжение 400 тыс. в. При напряжениях такого порядка заметная доля потерь вызывается коронным разрядом. Так как амплитуда переменного тока на 41% превышает эффективное напряжение, то для снижения

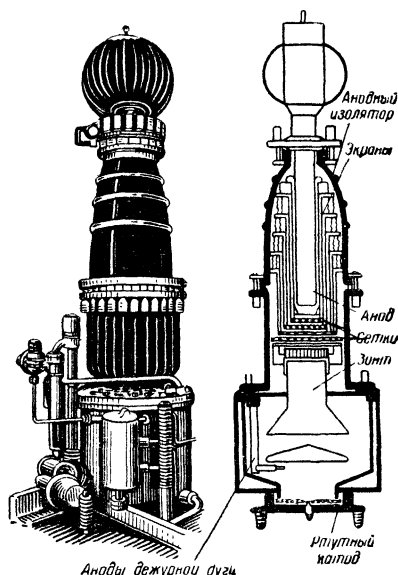


Рис. 364. Ртутный преобразователь тока.

потерь в очень длинных линиях передач, где следовало бы применять напряжение порядка 600 тыс. в, выгоднее сооружать линии с передачей энергии постоянным током. Постоянный ток в этих случаях предпочтительнее и по ряду других соображений: устраняется нагрузка линии реактивными токами и отпадает необходимость частотного и фазового согласования работы генераторов. Применение постоянного тока для высоковольтной передачи электроэнергии в настоящее время сделалось возможным благодаря усовершенствованиям, внесенным в конструкцию мощных *ртутных преобразователей тока*. Их устройство показано на рис. 364: Переменный ток, вырабатываемый генераторами и трансформированный к высокому напряжению, выпрямляется ртутными преобразователями, которые действуют в известной мере аналогично вакуумным кенотронам (§ 52). В отличие от кенотрона электронная эмиссия в данном случае создается электрической дугой, зажигаемой между вспомогательными («дежурными») анодами и ртутью, которая служит катодом. Интенсивное испарение ртути при высокой температуре дуги насыщает разреженное пространство между управляющей сеткой и катодом носителями тока—электронами и катио-

нами ртути, электроны при своем движении в высоковольтном поле к аноду создают дополнительную ионизацию паров ртути; в итоге обеспечивается большая плотность выпрямленного тока, тогда как обратный ток из-за нехватки носителей тока у анода почти отсутствует.

Для преобразования высоковольтного постоянного тока в переменный (или, как говорят, для *инвертирования* тока) ртутный преобразователь включают в конце линии в качестве ее нагрузки и подводят к управляющей сетке преобразователя переменное напряжение; полученный мощный переменный ток сетки питает через трансформаторы местную сеть переменного тока.

ВЭИ удалось создать высоковольтные ртутные преобразователи, выпрямляющие и инвертирующие ток мощностью более 100 тыс. *квт*. В 1950 г. была введена в эксплуатацию первая в мире опытно-промышленная передача постоянного тока между Каширой и Москвой (115 км). Строится электропередача постоянного тока от Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС в Донбасс (500 км) мощностью 750 тыс. *квт* при напряжении 800 тыс. *в*.
