

сообразными мероприятиями по улучшению $\cos\varphi$ являются мероприятия, направленные на улучшение естественного коэффициента мощности [1, 2]. Такие мероприятия состоят, главным образом, в следующем:

- 1) замена малозагруженных асинхронных двигателей двигателями меньшей мощности;
- 2) понижение напряжения для малозагруженных асинхронных двигателей;
- 3) ограничение холостого хода работающих асинхронных двигателей и др.

Остановимся на одном из этих мероприятий.

Снижение напряжения для малозагруженных асинхронных двигателей путем переключения обмоток статора с треугольника на звезду не всегда возможно или из-за загрузки, большей 50%, или когда по напряжению сети двигатель должен быть включен на звезду. В этих случаях иногда можно использовать обратное включение, т. е. подводить энергию к ротору, а статорную обмотку включить по схеме роторной. Такое мероприятие возможно только лишь в тех случаях, когда фазное напряжение ротора больше фазного напряжения сети. В данном случае эффект снижения потребления реактивной энергии будет определяться, если пренебречь изменением насыщения железа ротора, отношением фазного напряжения ротора к фазному напряжению сети в квадрате.

$$g = \left(\frac{U_{\phi \text{ рот}}}{U_{\phi \text{ сети}}} \right)^2.$$

Кратность снижения потребления реактивной мощности в данном случае будет отличаться от величины 3, как это имеет место при переключении с треугольника на звезду, и может принимать различную величину в зависимости от конструкции ротора двигателя. Проведение такого мероприятия позволяет расширить возможности к снижению потребления реактивной мощности двигателями, которые обычно нельзя переключать с треугольника на звезду по указанным причинам.

Как показывает практика эксплуатации электрооборудования, значение средневзвешенного коэффициента мощности почти никогда не достигает нейтрального значения ($\cos\varphi = 0,85$). Для обеспечения высокого значения $\cos\varphi = 0,92 \div 0,95$ необходимо проводить дополнительные мероприятия, которые позволят разгрузить элементы сети от перетекания реактивной энергии. Это становится возможным, если необходимую реактивную энергию генерировать непосредственно у потребителя. Наиболее экономичными средствами получения опережающей реактивной мощности в условиях промышленных предприятий с установленной мощностью трансформаторов на подстанции до 3—5 мва являются:

- а) установка статических конденсаторов;
- б) замена асинхронных двигателей синхронными;
- в) синхронизация асинхронных двигателей.

Применение того или иного мероприятия должно решаться на основе технико-экономических расчетов. Установка статических конденсаторов является дешевым методом компенсации из-за малых активных потерь в них. Конденсаторная батарея может быть установлена на стороне высокого и низкого напряжения. Установка конденсаторов на стороне высокого напряжения вызывает снижение потерь только в линии высокого напряжения и в генераторах, и, с этой точки зрения, экономический эффект применения высоковольтных конденсаторов ограничен, так как сами потери в распределительных линиях высокого напряжения относительно малы, а такие элементы сети, как понижающие трансформаторы и распределительная сеть низшего напряжения, от протекания реактивных токов не разгружаются.

Такие выводы можно сделать, если распределение энергии осуществляется на генераторном напряжении.

Установка конденсаторов на стороне низкого напряжения может разгрузить трансформаторы от протекания реактивных токов помимо линии высокого напряжения, а в случае установки конденсаторов у двигателей и сеть низкого напряжения. При определении экономического эффекта компенсации на стороне низкого напряжения необходимо учитывать сокращение потерь в линии низкого напряжения, обмотках трансформатора и линии высокого напряжения. Кроме того, необходимо учитывать стоимость высвобожденной мощности трансформатора, которая определится стоимостью присоединенного *кВА* трансформатора в год. Если учесть эти факторы, то даже при очень высокой стоимости конденсаторов низкого напряжения годовые расходы на такую компенсацию получаются сопоставимы с годовыми расходами при компенсации высоковольтными конденсаторами, а иногда эти расходы бывают меньше. Поэтому если рассматривать проблему улучшения *cos φ*, как общегосударственную, то необходимо ставить вопрос о внедрении низковольтных конденсаторов. Это позволит увеличить дополнительную активную нагрузку подстанции без подключения других трансформаторов.

Как известно [1; 2], замена асинхронных двигателей синхронными дает наибольший экономический эффект, так как в этом случае компенсирующий эффект определяется не только реактивной мощностью, выдаваемой двигателем в сеть, но и той реактивной мощностью, которая потреблялась асинхронным двигателем до его замены. Учитывая то обстоятельство, что в настоящее время выпуск синхронных двигателей не удовлетворяет полностью потребности народного хозяйства, можно с большим успехом применять синхронизацию асинхронных двигателей. При питании фазного ротора асинхронного двигателя постоянным током последний втягивается в синхронизм и получает возможность работы с опережающим коэффициентом мощности, приобретая свойства, сходные со свойствами синхронного двигателя. Компенсирующий эффект синхронизированного двигателя следует рассматривать как для синхронного двигателя, устанавливаемого вместо асинхронного

$$Q_k = Q_c + Q_{ac}$$

где Q_c — опережающая мощность синхронизированного асинхронного двигателя;

Q_{ac} — отстающая мощность асинхронного двигателя.

Характерным показателем работы компенсирующего устройства является коэффициент потерь. В данном случае этот коэффициент потерь определится по следующему уравнению:

$$K_k = \frac{\Delta P}{Q_k} = \frac{\frac{P_{дв}}{\eta_2} - P_{дв}}{Q_c + Q_{ac}},$$

где ΔP — увеличение активных потерь в двигателе при синхронизации;

η_2 — к.п.д. синхронизированного двигателя;

η_1 — к.п.д. двигателя до синхронизации. Например, требуется определить коэффициент потерь для синхронизированного двигателя мощностью 155 *кВт*, имеющий $\eta_1 = 0,92$ и $\cos \varphi = 0,82$. После синхронизации $\eta_2 = 0,91$ и $\cos \varphi_{опер} = 0,75$. Нагрузка двигателя 100 *квт*.

$$Q_{ac} = \frac{P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\eta_1} = \frac{155 \cdot 0,7}{0,92} = 118 \text{ квар,}$$

$$Q_c = \frac{P_{ном} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{опер}}{\eta_2} = \frac{155 \cdot 0,865}{0,91} = 149 \text{ квар,}$$

$$K_k = \frac{\frac{100}{0,91} - \frac{100}{0,92}}{118 + 149} = \frac{110 - 109}{267} = 0,00375.$$

Полученный коэффициент потерь оказался меньше коэффициента потерь для статических конденсаторов (0,004). В случае возможности получения более низкого опережающего коэффициента мощности синхронизированного двигателя коэффициент потерь будет еще меньше. Поэтому синхронизация асинхронных двигателей с точки зрения экономичности получается наиболее выгодной. В этом случае получаем наиболее низкую стоимость 1 кварчаса, а капиталовложения будут определяться стоимостью установки для получения постоянного тока.

В настоящее время имеется ряд схем синхронизации асинхронных двигателей. Наибольшее распространение получила схема ДАГ, применяемая в угольной промышленности. Эта схема предусматривает автоматическое управление. Однако, как показала дискуссия „О мерах повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий“ [3; 4; 5; 6], схема ДАГ имеет ряд недостатков и по своему устройству сложна. Основными недостатками являются зависимость тока возбуждения от подводимого напряжения, в результате чего при снижении напряжения устойчивость снижается, и малый срок службы селеновых выпрямителей. Поэтому с точки зрения надежности эта схема за основную не может быть принята.

Наиболее надежной схема синхронизации получается, если в качестве источника постоянного тока использовать генераторы постоянного тока небольшого напряжения и на большие токи. Для этой цели хорошо подходят сварочные генераторы и двухколлекторные генераторы для электролиза напряжением 6/12 в.

Под руководством автора на одном из заводов синхронизировано два асинхронных двигателя мощностью 155 и 135 квт при помощи двухколлекторного двигатель-генератора типа АНД и сварочного генератора.

Схема синхронизации показана на фиг. 1. Указанная схема предусматривает автоматическое управление синхронизацией.

Рассмотрим очень коротко работу этой схемы.

1. Пуск двигателя

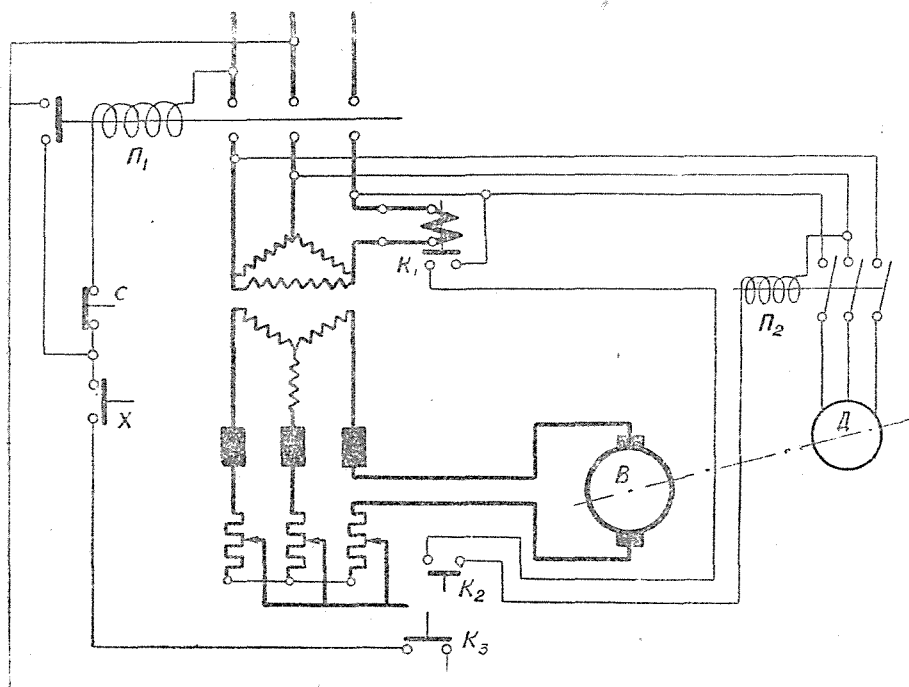
Режим пуска осуществляется обычным путем при помощи пускового реостата. Для обеспечения безаварийного пуска устанавливается блок-контакт K_3 , который не позволит включить пускатель двигателя P_1 до тех пор, пока не будет полностью введено сопротивление пускового реостата.

2. Синхронизация

Как только пусковой реостат будет полностью выведен, замыкается блок-контакт K_2 , который через нормально замкнутый контакт токового реле прямого действия K_1 замкнет цепь удерживающей катушки пускателя P_2 . Двигатель возбудителя начнет раскручиваться, и генератор возбуждается. Тогда через обмотки ротора двигателя будет протекать постоянный ток, и двигатель войдет в синхронную работу.

3. Вывод из синхронной работы

В случае загрузки двигателя, при которой двигатель будет выпадать из синхронизма, срабатывает токовое реле прямого действия от максимального автомата типа А, к подвижному якорю которого приделана нормально замкнутая пара контактов K_1 . При срабатывании токовое реле разрывает контакт K_1 , и пускатель Π_2 двигателя возбудителя отключается. С остановкой двигателя возбудителя постоянное поле исчезает, и двигатель переходит в асинхронный режим. Одна из фаз в этом случае будет замкнута с другими через обмотку якоря возбудителя.



Фиг. 1.

4. Автоматическая синхронизация

После того как нагрузка уменьшится, токовое реле замкнет свой контакт K_1 , тем самым включится пускатель Π_2 , двигатель возбудителя. По мере раскручивания возбудителя постепенно будет нарастать постоянный ток, протекающий через обмотки ротора, и двигатель войдет снова в синхронизм. Такая схема синхронизации дает возможность избежать сильных бросков тока статора при входе в синхронизм. Максимальное токовое реле имеет очень малый коэффициент возврата, что в данном случае очень важно.

Для изменения тока возврата токового реле необходимо между подвижным якорем и стержнем неподвижной магнитной системы изменять величину воздушного зазора. Изменением зазора можно определить ту величину тока нагрузки, при которой двигатель снова вводится в синхронную работу. Таким образом, применением только одного токового реле прямого действия максимального автомата имеется возможность обеспечить полную автоматизацию работы схемы синхронизации.

Синхронизируемые двигатели работают с резко переменной нагрузкой, однако выпадение из синхронизма получается очень редко и при

перегрузках больше 110—120%, от номинальной. Таким образом, утверждения [1; 2] о том, что синхронизированный двигатель выходит из синхронизма при коэффициенте загрузки, равном 70—80%, необоснованы. Как показывает опыт и теория устойчивости параллельной работы синхронного двигателя, предельная загрузка двигателя зависит от тока возбуждения и определяется из следующего уравнения [7]

$$P = \frac{U \cdot E_d}{X_d} \sin \delta,$$

где U — напряжение сети;

E_d — противоэдс синхронизированного двигателя, которая зависит от величины тока возбуждения, т. е. от тока, протекающего через ротор двигателя;

X_d — индуктивность по продольной оси двигателя;

δ — угол расхождения между векторами U и E_d .

Максимальная мощность будет тогда, когда угол δ примет значение 90°. Тогда уравнение примет вид

$$P_{\max} = \frac{U \cdot E_d}{X_d}.$$

Дальнейшее увеличение угла приводит к выходу из синхронной работы.

Приведенное уравнение показывает, что чем меньше значение опережающего коэффициента мощности, тем больше получается предельная мощность. Таким образом, необходимо создавать такие условия, когда ток возбуждения был бы по возможности большим и близким к номинальному значению тока ротора при асинхронной работе, тем самым и значение экономического коэффициента будет также уменьшаться.

При выборе двигателя, подлежащего синхронизации, необходимо отдавать предпочтение более мощным и быстроходным, так как у таких двигателей за счет большой скорости можно получить гораздо больший компенсирующий эффект при одном и том же токе возбуждения и числе витков на фазу по сравнению с тихоходными.

Экономический эффект от синхронизации асинхронных двигателей получается еще более ощутимый, чем компенсация при помощи статических конденсаторов из-за малой стоимости дополнительных капиталозатрат (стоимость генераторной установки).

Анализ системы компенсации коэффициента мощности промышленных предприятий указывает на необходимость компенсации как со стороны низкого напряжения, разгружая низковольтную сеть и трансформаторы от перетекания реактивных токов, так и на стороне высокого напряжения. Назовем такой способ компенсации комбинированным.

При комбинированном способе компенсации необходимая мощность конденсаторной батареи на стороне высокого напряжения будет зависеть от коэффициента мощности на стороне низкого напряжения, типа и мощности подключенных трансформаторов.

Результирующая нагрузка на стороне высокого напряжения будет состоять из суммы нагрузки на стороне низкого напряжения, потерь активной и реактивной мощности в обмотках трансформатора и реактивной мощности намагничивания трансформаторов.

$$S_{\text{тп}} = P_{\text{нн}} - j Q_{\text{нн}} + \Delta P_{\text{т}} - j \Delta Q_{\text{т}} - j g_{\text{в}} = P_{\text{вн}} - j Q_{\text{вн}},$$

где $P_{\text{нн}}$ и $Q_{\text{нн}}$ — нагрузки трансформаторов на шинах низкого напряжения;

$\Delta P_{\text{т}}$ и $\Delta Q_{\text{т}}$ — потери активной и реактивной мощности в обмотках трансформатора;

$g_{\text{в}}$ — мощность намагничивания трансформатора.

Величины ΔP_m и ΔQ_m при ухудшении $\cos\varphi$ увеличиваются и тем самым ухудшают $\cos\varphi$ на стороне высокого напряжения. Коэффициент мощности ухудшается и за счет намагничивающей мощности. Таким образом, даже при $\cos\varphi = 1$ на стороне низкого напряжения он не будет равен единице на стороне высокого напряжения.

Необходимую мощность конденсаторной батареи при желаемом коэффициенте мощности на стороне высокого напряжения $\cos\varphi_{жс}$ можно определить из выражения

$$Q_{бат} = Q_{вн} - P_{вн} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{жс}.$$

Из формулы видно, что при увеличении коэффициента мощности на стороне низкого напряжения необходимая мощность конденсаторной батареи все время уменьшается. Кроме того, улучшение $\cos\varphi$ на стороне низкого напряжения позволяет трансформаторы подстанций загружать дополнительной активной мощностью, которая может быть определена как разность возможной активной нагрузки при новом значении коэффициента мощности — $\cos\varphi_{жс \cdot н \cdot н}$ и возможной активной нагрузки при первоначальном значении $\cos\varphi_{н \cdot н}$, т. е. до компенсации

$$P_{доп} = S \cdot \cos \varphi_{жс \cdot н \cdot н} - S \cdot \cos \varphi_{н \cdot н}.$$

Для государственных интересов необходимо прежде всего достичь высокого $\cos\varphi$ на стороне низкого напряжения, а затем уже производить компенсацию на стороне высокого напряжения.

Выводы

1. Синхронизация асинхронных двигателей является наравне со статическими конденсаторами весьма эффективным средством улучшения $\cos\varphi$ электроустановки заводов.

2. Необходимо всемерно ограничивать компенсацию $\cos\varphi$ на стороне высокого напряжения, когда нет дефицита в реактивной энергии в системе, так как эффект от такой компенсации в общегосударственном масштабе очень мал, если распределительная сеть выполнена на генераторном напряжении и нет промежуточных трансформаций.

3. Необходимо всемерно популяризировать компенсацию $\cos\varphi$ на стороне низкого напряжения, так как это позволяет дополнительно привлечь внутренние резервы в виде дополнительных подключений активной мощности к трансформаторам подстанции и значительно сократить потери энергии во всех звеньях системы.

4. При определении экономического эффекта компенсации на стороне низкого напряжения необходимо учитывать и стоимость высвобожденных *kva* установленной мощности трансформаторов, как это делается относительно высвобожденной мощности генератора.

5. Ввиду того, что синхронизация крупных асинхронных двигателей при работе их с опережающим $\cos\varphi$ имеет коэффициент потерь меньше, чем для конденсаторов, а капитальные затраты также небольшие, то необходимо продолжать работу по изысканию простейших схем синхронизации и получению дешевых источников постоянного тока, каковыми могут быть механические преобразователи переменного тока в постоянный. Особого внимания здесь заслуживает преобразователь инженера Таманцева С. Г. [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров А. А. и Князевский Б. А. Электроснабжение промышленных предприятий. ГЭИ, 1951.
2. Мукосеев Ю. Л. Вопросы электроснабжения промышленных предприятий, ГЭИ, 1951.

3. Скоркин К. И. Синхронизация асинхронных электродвигателей на шахтах комбината „Сталинуголь“. Электричество 5, 1952.
 4. Ш и ш к и н О. П. Итоги внедрения синхронизации на нефтяных промыслах Грозного. Электричество 5, 1952.
 5. Киселев А. Ф. и Бесков М. Я. Синхронизация асинхронных двигателей по схеме ДАГ в асбестовой промышленности. Электричество 2, 1952.
 6. Дискуссия. О мерах повышения коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий. Электричество 2, 1953 и 1, 1954.
 7. Бергер А. Я. Синхронные машины. ГОНТИ, 1938.
 8. Артанов С. Г. Исследование синхронного двигателя с механическим выпрямителем. Автореферат, Москва, 1954.
-