Научная статья
УДК 621.313.13

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ, НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ 10/0,4 кВ

Антон Михайлович Никитин, Дмитрий Александрович Безик, Александр Николаевич Васькин
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

Аннотация. В статье рассмотрено влияния коэффициента реактивной мощности в зависимости от коэффициента загрузки асинхронных электродвигателей в распределительных сетях напряжением 10/0,4 кВ. Конфигурация распределительных сетей напряжением 10/0,4 кВ, большинство из которых построены в прошлом столетии, не соответствуют современным нормам и требованиям качества электрической энергии. В результате чего уровень потерь электрической энергии в распределительной сети 10/0,4 кВ является высоким. Актуальной задачей в настоящее время является снижение потерь электрической энергии в распределительных электрических сетях напряжением 10/0,4 кВ. Потери электрической энергии в распределительных сетях можно снизить за счет мероприятий направленных на компенсацию реактивной мощности. Выявлены факторы и причины возникновения анормальных режимов работы асинхронных электродвигателей. Зависимость синхронной частоты вращения от потребляемой реактивной мощности из сети заключается в том что, чем меньше величина синхронной частоты, тем больше потребляемый коэффициент реактивной мощности из питающей сети. С ростом поглощения коэффициента реактивной мощности, значения потерь электроэнергии растут в кубической прогрессии, что влечет за собой в свою очередь рост технико-экономических потерь. Рассмотрены способы полного или частичного снижения воздействия коэффициента реактивной мощности асинхронных электродвигателей в распределительных сетях напряжением 10/0,4 кВ. С помощью предложенных мероприятий можно снизить потери электроэнергии и повысить энергоэффективность энергетического комплекса в целом, что приведет к дополнительной прибыли, увеличит срок службы энергетического электрооборудования и повысит качество электрической энергии.

Ключевые слова: коэффициент реактивной мощности, электрическая энергия, асинхронный электродвигатель, коэффициента загрузки асинхронных электродвигателей, синхронная частота вращения, мощность намагничивания, мощность полей рассеяния, аппроксимирующие зависимости, ток холостого хода.

Для цитирования. Никитин А.М., Безик Д.А., Васькин А.Н. Влияние коэффициента реактивной мощности асинхронных электродвигателей, в зависимости от коэффициента загрузки, на распределительные сети 10/0,4 кВ // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 1 (101). С. 74-77.

Original article

THE INFLUENCE OF THE REACTIVE POWER COEFFICIENT OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS DEPENDING ON THE LOAD COEFFICIENT FOR 10/0.4 kV TO DISTRIBUTION NETWORKS

Anton M. Nikitin, Dmitry A. Bezik, Alexandr N. Vas'kin
Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

Abstract. The article considers the influence of the reactive power coefficient depending on the load factor of asynchronous electric motors to distribution networks with a voltage of 10/0.4 kV. The configuration of distribution networks with a voltage of 10/0.4 kV, most of which were built in the last century, do not meet modern standards and requirements for the quality of electric energy. As a result, the level of electrical energy losses in the 10/0.4 kV distribution network is high. An urgent task at present is to reduce the loss of electrical energy in distribution electric networks with a voltage of 10/0.4 kV. The losses of electrical energy in distribution networks can be reduced through measures aimed at compensating reactive power. The factors and causes of abnormal operating modes of asynchronous electric motors have been identified. The dependence of the synchronous rotation frequency on the reactive power consumed from the network is that the smaller the value of the synchronous frequency, the greater the reactive power consumption coefficient from the supply network. With an increase in the absorption of the reactive power coefficient, the values of electricity losses grow in cubic progression, which in turn entails an increase in technical and economic losses. The methods of full or partial reduction of the influence of the reactive power coefficient of asynchronous electric motors in distribution networks with a voltage of 10/0.4 kV are considered. With the help of the proposed measures, it is possible to reduce electricity losses and increase the energy efficiency of the energy complex as a whole, which will lead to additional profits, increase the service life of electric power equipment and improve the quality of electric energy.

Keywords: reactive power coefficient, electrical energy, asynchronous electric motor, load coefficient of asynchronous electric motors, synchronous rotation frequency, magnetization power, power of scattering fields, approximating dependencies, no-load current.

For citation: A.M. Nikitin, D.A. Bezik, A.N. Vas'kin. The influence of the reactive power coefficient of asynchronous electric motors depending on the load coefficient for 10/0.4 kV to distribution networks. Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024; (1): 74-77 (In Russ.).

Введение. Асинхронные электродвигатели в настоящее время широко используются во всех отраслях, они составляют основу электропривода для большинства технологических процессов. Асинхронные электродвигатели имеют как достоинства, так и недостатки. Одним из недостатков является негатив-

ное влияние, на распределительные сети напряжением 10/0,4 кВ, повышенного коэффициента реактивной мощности. Во время работы асинхронного электродвигателя происходит потребление реактивной мощности, которое зависит от множества факторов, таких как синхронизм, коэффициент загрузки асинхронного электродвигателя, условия эксплуатации и др. Излишнее потребление реактивной мощности влечет за собой технико-экономические потери, таким образом, возникает необходимость в принятии мер направленных на снижение потребления реактивной мощности и энергосбережение. В этой связи актуальной задачей, является рационализация эксплуатации асинхронных электродвигателей.

Материалы и методы исследований. В настоящее время асинхронные электродвигатели являются основными устройствами на предприятиях, которые преобразуют электрическую энергию в механическую, они составляют основу электропривода для большинства технологических процессов [1].

Асинхронные электродвигатели используют порядка 40 % вырабатываемой электроэнергии при этом затраты на эксплуатацию и ремонт составляют около 5% от общих затрат на эксплуатацию электрооборудования в целом.

Во время работы асинхронного двигателя происходит потребление реактивной мощности из питающей сети, которая состоит из двух основных составляющих: из мощности намагничивания Qн, и мощности полей рассеяния $Q_{пр}$.

Расчет реактивной мощности асинхронного электродвигателя производится по формуле [2]:

$$Q_{АД} = Q_н + Q_{пр} = Q_н + Q_{ном}k_з^2, \quad (1)$$

где $Q_{ном}$ – потери при номинальной нагрузке на рассеяние в асинхронном электродвигателе, кВАр;

$k_з$ – коэффициент загрузки по величине потребляемой активной мощности.

Как видно из формулы (1) величина реактивной мощности намагничивания не зависит от нагрузки на асинхронный электродвигатель, а вот поглощаемая мощность полей рассеяния асинхронного электродвигателя изменяется пропорционально квадрату загрузочного коэффициента от номинальной реактивной мощности [2].

Коэффициент загрузки является одним из основных показателей, характеризующих уровень нагрузки на асинхронные электродвигатели. Основным нормативным показателем потребляемой реактивной мощности асинхронными электродвигателями является tgφ – коэффициент реактивной мощности асинхронного электродвигателя. Отсюда можно сделать следующий вывод, что для определения величины воздействия двигателей на потребляемую реактивную мощность из сети предприятия, необходимо подвергнуть анализу воздействие коэффициента загрузки асинхронного электродвигателя на потребляемый коэффициент реактивной мощности из сети предприятия [1,4].

Реактивная мощность намагничивания асинхронных электродвигателей определятся по следующей формуле [2]:

$$Q_н = \frac{I_0}{I_{ном}} * \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}\cos\varphi_{ном}} \quad (2)$$

где I_0 –поглощаемый ток асинхронного электродвигателя при холостом ходе, А;

$I_{ном}$ – номинальное значение тока асинхронного электродвигателя, А;

$P_{ном}$ – номинальная мощность асинхронного электродвигателя, кВт;

$\eta_{ном}$ – номинальный КПД асинхронного электродвигателя;

$\cos\varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности асинхронного электродвигателя;

Реактивная мощность асинхронных электродвигателей для полей рассеяния рассчитывается по формуле [2]:

$$Q_p = \frac{P^2}{P_{ном}\eta_{ном}}\left(tg\varphi_{ном} - \frac{1}{\cos\varphi_{ном}}\frac{I_0}{I_{ном}}\right) \quad (3)$$

где $tg\varphi_{ном}$ – номинальное значение коэффициента реактивной мощности электродвигателя;

P – активная нагрузка поглощаемая из сети асинхронным электродвигателем, кВт.

Подставив (2) и (3) в формулу (1) после преобразований, с учетом загрузочного коэффициента асинхронного электродвигателя $k_з = P/P_{ном}$, получим следующее выражение:

$$Q_{АД} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}\left[\frac{I_0}{I_{ном}}\sqrt{1+tg^2\varphi_{ном}} + \left(tg\varphi_{ном} - \frac{I_0}{I_{ном}}\sqrt{1+tg^2\varphi_{ном}}\right)k_з^2\right] \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет точнее рассчитать величину потребляемой реактивной мощности асинхронным электродвигателем, благодаря тому что, в данной формуле указан фактический уровень потребляемой реактивной мощности, а не среднее значение.

С учетом полученного выражения (4), определим коэффициент реактивной мощности асинхронного электродвигателя по формуле [3]:

$$\mathrm{tg}\varphi_{АД} = \frac{\frac{I_0}{I_{ном}}\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\varphi_{ном}} + \left(\mathrm{tg}\varphi_{ном} - \frac{I_0}{I_{ном}}\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\varphi_{ном}}\right)k_з^2}{\eta_{ном}k_з} \quad (5)$$

Из формулы (5) коэффициент реактивной мощности асинхронного электродвигателя зависит от уровня нагрузки. Для оценки зависимости реактивной мощности асинхронного электродвигателя от уровня нагрузки с использованием справочных данных для асинхронных электродвигателей были найдены значения коэффициент $\mathrm{tg}\varphi_{АД}$ при значениях коэффициента загрузки в приделах $0<k_з<1$ для наиболее распространенных серий 4А и АИР с мощностью $0{,}06<P_{ном}<250$ кВт и частотой 750 об/мин, 1000 об/мин, 1500 об/мин и 3000 об/мин.

Используя методику расчета токов холостого хода применимую для асинхронных электродвигателей [7,8], получим значения токов в пределах $25\%<I_{хх}<66\%$ для серии 4А и $26\%<I_{хх}<61\%$ для серии АИР от номинального тока. Полученные значения существенно воздействуют на коэффициент реактивной мощности $\mathrm{tg}\varphi_{АД}$. Для исследования воспользуемся наиболее распространенными асинхронными электродвигателями серии 4А и серии АИР, причем величина тока холостого хода и значение коэффициента реактивной мощности $\mathrm{tg}\varphi_{АД}$ приблизительно схожи для серий исследуемых электродвигателей, что позволяет использовать степенную аппроксимирующую функцию $\mathrm{tg}\varphi_{АД} = f(k_з)$.

Из анализа полученных графиков (рис. 1, 2), коэффициент загрузки значительно воздействует на уровень потребляемой реактивной мощности из питающей сети предприятия. При уменьшении коэффициента загрузки, коэффициент реактивной мощности и уровень потребления реактивной мощности из сети предприятия возрастают.

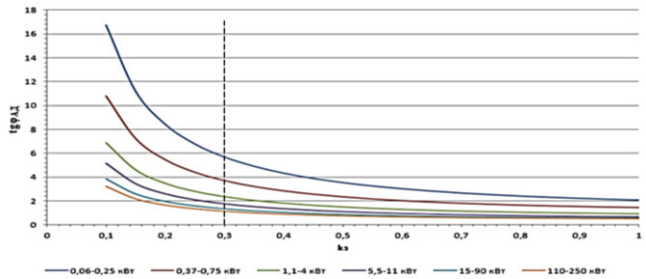

Рисунок 1 – Аппроксимирующие зависимости $\mathrm{tg}\varphi_{АД}=f(k_з)$ асинхронных электродвигателей серии 4А

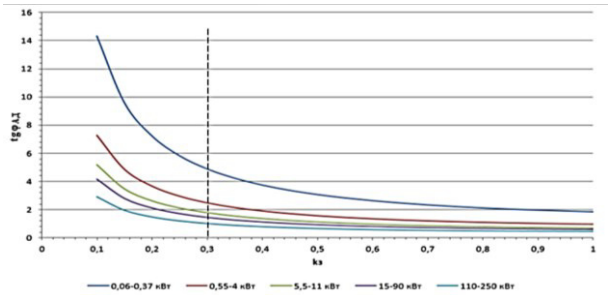

Рисунок 2 – Аппроксимирующие зависимости $\mathrm{tg}\varphi_{АД}=f(k_з)$ асинхронных электродвигателей серии АИР

Графики аппроксимирующей зависимости $\mathrm{tg}\varphi_{АД} = f(k_з)$ асинхронных электродвигатели серии 4А по сравнению с асинхронными электродвигателями серии АИР имеют коэффициент реактивной мощности $\mathrm{tg}\varphi_{АД}$ большей величины.

Немаловажное влияние на уровень потребляемой реактивной мощности из сети предприятия оказывает синхронная частота вращения электродвигателей [6,8,9]. На рисунках 3 и 4 представлены графические зависимости коэффициента реактивной мощности от номинальной мощности асинхронного электродвигателя $\mathrm{tg}\varphi_{АД}=f(P_{ном})$ при разном количестве пар полюсов асинхронных электродвигателей.

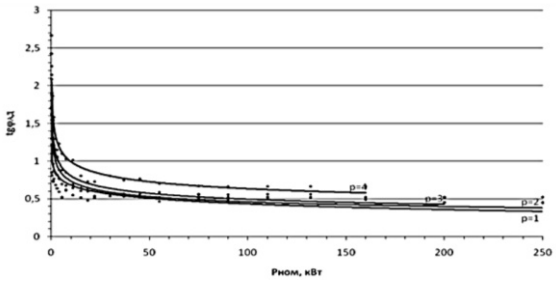

Рисунок 3– Графическая зависимость номинальной мощности асинхронного электродвигателя серии 4А от коэффициента реактивной мощности

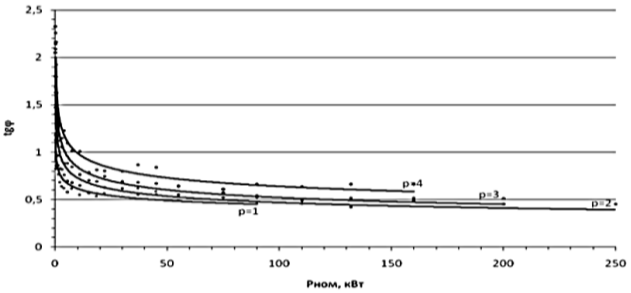

Рисунок 4 – Графическая зависимость номинальной мощности асинхронного электродвигателя серии АИР от коэффициента реактивной мощности

Из анализа полученных графиков видно, что зависимость синхронной частоты вращения от потребляемой реактивной мощности из сети заключается в том что, чем меньше величина синхронной частоты, тем больше потребляемый коэффициент реактивной мощности из питающей сети.

В структуре потерь электроэнергии в распределительных сетях предприятия на потери связанные с передачей реактивной мощности приходится порядка 47 % от общего количества потерь. С ростом поглощения коэффициента реактивной мощности из сети предприятия, значения потерь элек-

троэнергии растут в кубической прогрессии, что влечет за собой в свою очередь рост технико-экономические потерь [5,10].

Выводы. Для снижения потерь электроэнергии необходимо снизить уровень потребления реактивной составляющей за счет применения компенсационных устройств, выбора при проектировании или замене асинхронных электродвигателей с большей активной мощностью и производить замену асинхронных электродвигателей на такие же по мощности, но синхронные электродвигатели при учете технико-экономических составляющих.

Список источников

1. Ткачёв А.Н., Селунский В.В. Электрические машины: учеб. пособие. Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2021. – Режим доступа: https://www.inueco.ru/rio/2021/978-5-6046573-3-1.pdf, свободный. – Загл. с экрана. 131 с.
2. Кацман М.М. Электрические машины: учеб. для студентов сред. проф. образования. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, М.: Academia, 2001. 463 с
3. Беляевский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. 2010. № 6. С. 66-69.
4. Беляевский Р.В. Основные факторы увеличения потребления реактивной мощности асинхронными двигателями // Современная техника и технологии: исследования и разработки: сб. докл. междунар. науч. заочной конф., Липецк, 23 июля 2011 г. / отв. ред. А.В. Горбенко. Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. С. 61–64.
5. Извеков Е.А., Косенков Р.И. Анализ потребления реактивной мощности асинхронными электродвигателями // Наука, образование и инновации в современном мире: материалы нац. науч.-практ. конф. Ч. I. Воронеж: Воронежский ГАУ, 2019. С. 128-135.
6. Осинцева В.В., Мезенцев П.А. Роль устройств защиты в повышении надежности работы асинхронных электродвигателей // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы XII междунар. науч.-практ. конф. Междуреченск: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачёва, 2023. С. 553.1-553.5.
7. Шумский Д.В. Повышение энергетической эффективности электроприводов // Наука и молодежь: материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Барнаул: Алтайский государственный техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2023. С. 311-313.
8. Беляевский Р.В Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / науч. рук. В.М. Ефременко; ФГБОУ ВО Кузбасский Государственный техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева. Кемерово, 2015. 132 с.
9. Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // Вестник Тверского государственного технического университета. 2023. № 1 (17). С. 55-60.
10. Семенов А.В., Дружинина Е.С. Пути компенсации реактивной мощности в сетях переменного тока // Научно-практический прогресс в сельскохозяйственном производстве: сб. тез. междунар. студенческой науч.-практ. конф. Великие Луки: Великолукская ГСХА, 2022. С. 100-103.

Информация об авторах:

А.М. Никитин – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнегретики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Д.А. Безик – директор института энергетики и природопользования, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

А.Н. Васькин – старший преподаватель кафедры автоматики, физики и математики, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, vaskin32@mail.ru.

Information about the authors:

A.M. Nikitin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electroenegretics and Electrical Technologies, Bryansk State Agrarian University.

D.A. Bezik - Director of the Institute of Energy and Environmental Management, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Agrarian University.

AN. Vas'kin - Senior lecturer of the Department of Automation, Physics and Mathematics, Bryansk State Agrarian University, vaskin32@mail.ru.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.11.2023; одобрена после рецензирования 24.11.2023, принята к публикации 31.01.2024.

The article was submitted 09.11.2023; approved after rewiewing 24.11.2023; accepted for publication 31.01.2024.

© Никитин А.М., Безик Д.А., Васькин А.Н.