

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Е.А. Федотов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: В статье представлен расчет режимов работы силовых трансформаторов по определению величины оптимальной загрузки, при которой коэффициент полезного действия трансформатора достигает максимального значения, а также предложены варианты повышения эффективности эксплуатации силовых трансформаторов промышленных предприятий.

Ключевые слова: трансформатор, потери мощности, коэффициент загрузки, электрические сети, потери электроэнергии.

INFLUENCE OF A LOAD CAPABILITY OF POWER TRANSFORMERS ON THEIR OPERATIONAL CHARACTERISTICS

Gracheva Elena I., Naumov Oleg V., Fedotov Evgeny A.
Kazan state power university, Kazan

Abstract: In article calculation of an operating mode of power transformers for determination of optimum loading in case of which the efficiency of the transformer will reach the maximum value is provided, options of increase in efficiency of operation of power transformers of the industrial enterprises are also offered.

Keywords: Transformer, capacity losses, load factor, electric networks, losses of the electric power.

Последствия экономического и энергетического кризиса заставляют обратить внимание на вопросы оценки уровней потерь мощности и электроэнергии и возможности их уменьшения при передаче электрической энергии как в целом, так и в отдельных элементах системы электроснабжения, в частности в трансформаторах. Наблюдается рост потерь электроэнергии в силовых трансформаторах по мере их старения по сравнению с паспортными данными, полученными в год выпуска. При этом разработчики трансформаторов, как правило, утверждают, что потери электроэнергии в процессе эксплуатации в исправных трансформаторах если и увеличиваются, то не более чем на 5% за весь срок службы трансформатора [1].

Проведенные исследования показали, что старение трансформатора приводит к росту потерь электроэнергии, порой весьма и весьма значительному, в зависимости от условий работы [2].

Как известно, установленная мощность трансформаторов в цепи «электрическая станция – потребитель электрической энергии» на порядок больше генераторных мощностей электрической станции. При этом неоднократная трансформация электрической энергии связана с ее потерями, и, при прочих равных условиях, чем больше ступеней трансформации, тем выше потери.

Общепринятой оценкой эффективности эксплуатации систем электроснабжения является метод приведенных затрат.

При решении некоторых более узких задач могут приниматься другие критерии для определения эффективности работы электрооборудования [3].

Минимум потерь мощности (электроэнергии), как критерий для выбора номинальной установленной мощности трансформатора или степени его загрузки, может быть применен для вариантов схем электроснабжения с неизменными сечениями и марками кабелей, их длиной, схемами и оборудованием, установленным на подстанциях и т.д.

В некоторых случаях предлагается в качестве критерия оптимальной загрузки трансформатора считать его загрузку, соответствующую максимуму коэффициента полезного действия [4].

Практически этим критерием воспользоваться трудно, так как максимум КПД трансформаторов в широком диапазоне изменения вторичной нагрузки ($k_3 = 0,4 \div 1,5$) выражен слабо. Покажем это на примере.

Коэффициент полезного действия трансформатора, как известно, это отношение отдаваемой мощности P_2 к мощности P_1 , поступающей в первичную обмотку.

По уравнению баланса мощности в цепи трансформатора имеем [5]

$$P_1 = P_2 + \Delta P = P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ – потери мощности в стали; $\Delta P_{\text{м}}$ – потери мощности в меди; ΔP – суммарная потери мощности; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi$ – активная мощность потребителей; U_2 – напряжение вторичной обмотки трансформатора; I_2 – ток вторичной обмотки трансформатора; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности трансформатора.

Потери мощности в стали магнитопровода $\Delta P_{\text{ст}}$ из-за гистерезиса и вихревых токов зависят от амплитуды магнитного потока, а поскольку магнитный поток – величина постоянная, то потери мощности в стали не изменяются, не зависят от нагрузки при постоянном значении напряжения питания. Эти потери составляют 1–2% от номинальной мощности трансформатора [6].

Потери мощности в проводах обмоток зависят от нагрузки, так как

$$\Delta P_{\text{м}} = R_{\text{к}} I_1^2, \quad (2)$$

где $R_{\text{к}}$ – сопротивление обмоток трансформатора; I_1 – ток первичной обмотки трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора можно рассчитать по выражению [7]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}}}. \quad (3)$$

Из опытов холостого хода и короткого замыкания получаем $\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{хх}}$, $\Delta P_{\text{м}} = R_{\text{к}} I_1^2 = k_3^2 \Delta P_{\text{кз}}$, где $k_3 = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$ – коэффициент загрузки; $I_{1\text{ном}}$ – номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Значение коэффициента полезного действия можно рассчитать по выражению

$$\eta = \frac{k_3 S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{k_3 S_{\text{ном}} \cos \varphi + \Delta P_{\text{хх}} + k_3^2 \Delta P_{\text{кз}}}. \quad (4)$$

По выражению (4) возможно вычислить k_3 , при котором коэффициент полезного действия максимален. Приравняв нулю производную $\frac{d\eta}{dk_3}$, получим

$$k_3^2 \Delta P_{кз} = \Delta P_{xx} . \quad (5)$$

Следовательно, КПД имеет максимальное значение при равенстве потерь мощности в проводах обмоток и в стали. Следовательно, оптимальный коэффициент загрузки трансформатора

$$k_3 = \sqrt{\frac{\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}} . \quad (6)$$

Обычно для современных силовых трансформаторов $\frac{\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}} = 0,2 - 0,3$ и, следовательно, максимум КПД имеет место при $k_3 = 0,4 - 0,5$.

На рис. 1 показана зависимость КПД трансформатора мощностью 400 кВА от коэффициента загрузки при фиксированных $\cos\varphi$.

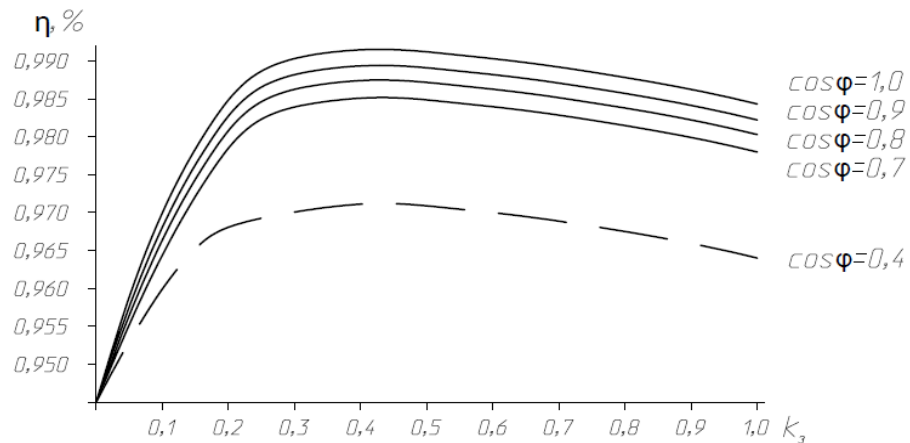


Рис. 1. График зависимости КПД от коэффициента загрузки трансформатора и коэффициента мощности нагрузки

Из рис. 1 видно, что трансформатор имеет практически постоянный КПД в широком диапазоне изменения нагрузки от 0,5 до 1,0. При малых нагрузках и уменьшении коэффициента мощности КПД трансформатора резко снижается.

На рис. 2 показана зависимость оптимального коэффициента загрузки от номинальной мощности трансформаторов 10/0,4 кВ. Видно, что при увеличении мощности трансформатора его оптимальный коэффициент загрузки уменьшается.

Развитая номенклатура трансформаторов, выпускаемых промышленностью, предполагая фиксированные значения потерь мощности в стали и в меди для каждого типа трансформатора при заданном графике потребления и неизменных остальных элементах системы электроснабжения, позволяет реально ставить вопрос о выборе номинальной мощности трансформатора, предполагаемого к установке, в зависимости от выбранного критерия оптимальности [8].

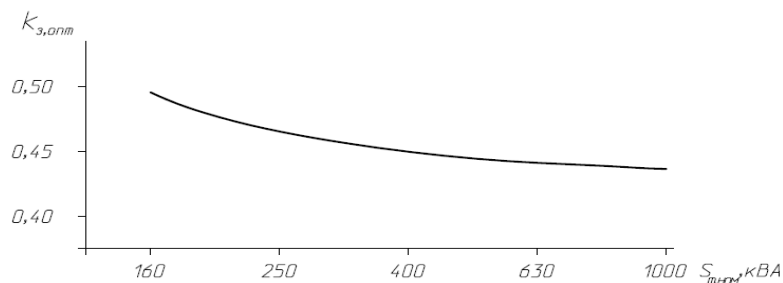


Рис. 2. Зависимость оптимального коэффициента загрузки трансформатора 10/0,4кВ от его номинальной мощности

При рассмотрении вопроса об оптимальной загрузке трансформаторов необходимо указать, что в каждый конкретный момент времени нагрузка трансформатора определяется мощностью приемников электрической энергии, подключенных к его обмоткам, то есть графиком потребления, характером технологического процесса [9].

С изменением коэффициента загрузки трансформатора от нуля и выше его коэффициент полезного действия возрастает до определенного значения, а потом понижается. При этом суммарные потери мощности только увеличиваются. Максимум коэффициента полезного действия не соответствует минимуму потерь мощности [10].

Данная особенность позволяет рассмотреть следующие варианты повышения эффективности эксплуатации трансформаторных подстанций промышленных предприятий:

1) если общая мощность, потребляемая нагрузкой, ниже уровня 30–40% $S_{н.т.}$, в качестве меры энергосбережения целесообразно отключить один или несколько трансформаторов, чтобы довести загрузку остальных трансформаторов до оптимальной величины;

2) при замене трансформаторов, исчерпавших ресурс, или модернизации трансформаторных подстанций предпочтительной является установка энергоэффективных трансформаторов с улучшенными характеристиками (такими, как нагрузочные потери и потери в стали), а также наличием системы мониторинга и диагностики состояния трансформатора (табл. 1);

3) применение компенсирующих устройств для увеличения коэффициента полезного действия силовых трансформаторов промышленных предприятий нецелесообразно, так как повышение КПД за счет роста коэффициента мощности происходит, в среднем, менее чем на 1–3%.

Таблица 1

Потери короткого замыкания и холостого хода силовых трансформаторов 6(10)/0,4кВ

Завод	Потери, кВт	100кВА		250кВА		400кВА		630кВА		1000кВА	
		сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.	сух.	масл.
ЗАО ГК "Электроцит-ТМ-Самара", г.Самара	XX	550	400	730	580	1000	830	1400	1050	1950	1550
	KЗ	2300	2400	3700	3700	4900	5900	7100	7600	10000	10800
Холдинговая компания "Электрозавод", г.Москва	XX	540	290	900	570	1200	830	1650	1060	2150	1400
	KЗ	1250	1970	3000	3700	3900	5400	5730	7450	8400	10800
ООО "Тольяттинский трансформатор", г.Тольятти	XX	420	305	750	610	1150	900	1400	1250	2000	1900
	KЗ	2100	2000	3700	3700	5700	5500	6700	7600	8900	12200
ОАО Уралэлектротяжмаш Гидромаш", г.Екатеринбург	XX	390	290	750	550	820	800	1300	1010	1900	1400
	KЗ	1720	2200	2900	4200	4300	5600	5500	8500	8250	10600
Производственная группа "Трансформер", г.Подольск	XX	420	270	750	530	1150	870	1400	1240	2000	1600
	KЗ	2100	1970	3700	3700	5700	5600	6700	7600	8900	10800

Продолжение таблицы 1

ОАО "Электроцит", г.Чехов	XX		390	280	750	520	1150	750	1500	1000	1950	1400
	КЗ		1740	1970	3040	3700	4260	5400	6350	7600	8700	10600
Требования европейских стандартов энергоэффективности HD 428, HD 538	XX	A'	440	320	820	650	1150	930	1500	1300	2000	1700
		B'		260		530		750		1030		1400
		C'		210		425		610		860		1100
	КЗ	A	2000	1750	3500	3250	4900	4600	7300	6500	10000	10500
		B		2150		4200		6000		8400		13000
		C		1475		2750		3850		5400		9500

Согласно европейским стандартам гармонизации [11, 12], основными показателями энергетической эффективности для силовых трансформаторов являются потери холостого хода и короткого замыкания. Нормы HD 428.1 для масляных трансформаторов допускают три уровня потерь короткого замыкания (А, В, С) и три уровня потерь холостого хода (А', В', С').

Литература

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Интермент Инжиниринг, 2006. 672 с.
2. Калявин В.П., Рыбаков Л.М. Надежность и диагностика электроустановок. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2000. 348 с.
3. Конюхова Е.А. Электроснабжение: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. 502 с.
4. Федоров О.В. Некоторые особенности структуры систем внутрицехового электроснабжения// Надежность и безопасность энергетики. 2015. №3(30). С. 30–33.
5. Козаков Ю.Б., Козлов А.Б., Коротков А.В. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях.// Электротехника. 2006. №5.
6. Коротков А.В., Фролов В.Я. Результаты измерений мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы. // Электрика. 2011. №8.
7. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях// Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. №1-2. С. 53–63.
8. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Проблемы современного трансформаторостроения в России. // Электричество. 2000. №8.
9. Голубцов Н.В., Федоров О.В. Электротехнические комплексы и системы предприятий как объекты энергосбережения// Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы: мат-лы Междунар. науч.-практич. конф. Ульяновск: УГТУ, 2012. С.222–226.
10. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р., Серпионова Т.А. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей// Технические науки – от теории к практике: мат-лы ЛП междунар. науч.-практич. конф. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». 2015. №12 (48). С.105–114.
11. HD 428. Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50Гц от 50 до 2500кВА с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36кВ.
12. HD 538. Трехфазные распределительные трансформаторы с рабочей частотой 50Гц от 100 до 2500кВА с масляным охлаждением и максимальным напряжением не выше 36кВ.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: gracheva.i@bk.ru.

Наумов Олег Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение системы сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: 311670@list.ru.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение системы сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Kudrin B.I. Elektrosnabzheniye promyshlennykh predpriyatiy: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy. M.: Interment Inzhiniring, 2006. 672 p.
2. Kalyavin V.P., Rybakov L.M. Nadezhnost' i diagnostika elektroustanovok. Yoshkar-Ola: Mar. gos. un-t, 2000. 348 p.
3. Konyukhova E.A. Elektrosnabzheniye: uchebnik dlya vuzov. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2014. 502 p.
4. Fedorov O.V. Nekotoryye osobennosti struktury sistem vnutritsekhovogo elektrosnabzheniya// Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. 2015. №3 (30). P. 30–33.
5. Kozakov Ju.B., Kozlov A.B., Korotkov A.V. Uchet izmeneniya poter' kholostogo khoda transformatorov v period sroka sluzhby pri raschete poter' v raspredelitel'nykh setyakh. Elektrotehnika. 2006. №5.
6. Korotkov A.V., Frolov V.Ya. Rezul'taty izmereniy moshchnosti poter' kholostogo khoda transformatorov s razlichnym srokom sluzhby. Elektriya. 2011. №8.
7. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Uchet poter' kholostogo khoda transformatorov v period ekspluatatsii pri raschete poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2016, №1-2. P. 53–63.
8. Lizunov S.D., Lokhanin A.K. Problemy sovremennogo transformatorostroyeniya v Rossii. Elektrichestvo. 2000. №8.
9. Golubtsov N.V., Fedorov O.V. Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy predpriyatiy kak ob'yekty energosberezheniya// Elektricheskyye apparaty i elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy: -mat-ly Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Ul'yanovsk: UGTU, 2012. P.222–226.
10. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R., Serpionova T.A. Modelirovaniye parametrov funktsional'nykh kharakteristik tsekhovykh setey// Tekhnicheskiye nauki - ot teorii k praktike: mat-ly mezhdunar. LIИ nauch.-praktich. konf. Novosibirsk: Izd. ANS «SibAK». 2015. №12 (48). P.105–114.
11. HD 428. Trekhfaznyye raspredelitel'nyye transformatory s rabochey chastotoy 50Gts ot 50 do 2500kVA s maslyanyam okhlazhdeniyem i maksimal'nyy napryazheniyem ne vyshe 36kV.
12. HD 538. Trekhfaznyye raspredelitel'nyye transformatory s rabochey chastotoy 50Gts ot 100 do 2500kVA s maslyanyam okhlazhdeniyem i maksimal'nyy napryazheniyem ne vyshe 36kV.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna Kazan State Power Engineering University, Associate Professor of the Department "Electric Power Supply of Industrial Enterprises", Doctor of Technical Sciences.

Naumov Oleg Vitalievich Kazan State Energy University Associate Professor of the Department "Electric Power Systems and Networks" Candidate of Technical Sciences. E-mail: 311670@list.ru.

© *Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Е.А. Федотов*

Fedotov Evgeny Aleksandrovich Kazan State Energy University Associate Professor of the Department "Electric Power Stations" Candidate of Technical Sciences.

Поступила в редакцию

19 июня 2017 г.