

2. Б е л я е в, В. П. Электромеханика. Электромеханическое преобразование при частотном управлении электрическими машинами / В. П. Беляев, Л. М. Давидович. – Минск: БГТУ, 2004.

3. Б р а с л а в с к и й, И. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением / И. Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

4. С п о с о б широтно-импульсной модуляции выходного напряжения переменного тока: а. с. 764096 (СССР) / В. П. Беляев, Г. И. Гульков, В. Г. Сидоров; заявл. в 1979 // Б. И. – 1980. – № 34. – С. 38.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. http://www.artesk.ru/softstarter_siemens

2. B e l y a e v, V. P. Electrical Engineering. Electrical Engineering Transformation at Variable Frequency Control of Electric Machinery / V. P. Belyaev, L. M. Davidovich. – Minsk: BGTU, 2004.

3. B r a s l a v s k y, I. Ya. Asynchronous Semiconducting Electric Drive with Parametric Control / I. Ya. Braslavsky. – M.: Energoatomizdat, 1988.

4. M e t h o d for Pulse-Width Modulation of A.C. Output Voltage: Inventor's Certificate 764096 (USSR) / V. P. Belyaev, G. I. Gulkov, V. G. Sidorov; Invention Application in 1979 // B. I. – 1980. – No 34. – P. 38.

Представлена кафедрой
полиграфического оборудования
и систем обработки информации

Поступила 04.03.2013

УДК 621.314

ОБ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЯХ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Канд. техн. наук, доц. ГОНЧАР А. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: bntu.epp@yandex.ru

ON SPECIFIC LOSSES OF TRANSFORMER POWER GONCHAR A. A.

Belarusian National Technical University

Выполнен поиск зоны оптимальной загрузки трансформатора по минимуму суммарных потерь активной мощности.

Ключевые слова: мощность трансформатора, удельные потери, коэффициент загрузки.

Zone searching for optimum transformer loading according to minimum of total active power losses has been carried out in the paper.

Keywords: transformer power, specific losses, loading factor.

В литературе, связанной с выбором и эксплуатацией трансформаторов, не прекращается поиск зон их оптимальной загрузки. При этом критерии называются разные. Один из них – поиск зоны загрузки трансформатора по минимуму суммарных потерь активной мощности. Для доказательства якобы существования таких зон по указанному критерию автором рассматривается зависимость КПД от коэффициента загрузки: $\eta = f(K)$.

Принятое выражение для КПД трансформатора можно привести к следующему виду:

$$\eta = \frac{KS_n \cos \varphi_2}{KS_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}}{KS_n \cos \varphi_2}} = \frac{1}{1 + \Sigma \Delta P_{\text{уд}}}; \quad (1)$$

$$\frac{\Sigma \Delta P}{KS_n \cos \varphi_2} = \frac{\Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}}{KS_n \cos \varphi_2} = \Sigma \Delta P_{\text{уд}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент загрузки трансформатора; S_n – номинальная мощность трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки; $\Delta P_{\text{ст}}$, $\Delta P_{\text{мн}}$ – соответственно потери мощности в стали и меди, паспортные данные трансформатора; $\Sigma \Delta P$ – суммарные потери мощности в именованных единицах; $\Sigma \Delta P_{\text{уд}}$ – удельные потери мощности, т. е. потери мощности, приходящиеся на единицу передаваемой мощности трансформатора, как и следовало ожидать – безразмерная величина, как и КПД (η).

Фактически η состоит из следующих функций:

$P_2 = KS_n \cos \varphi_2$ – активная мощность вторичной обмотки. Это линейная зависимость $P_2 = f(K)$, принимая $S_n \cos \varphi_2 = \text{const}$;

$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}$ – суммарные потери мощности. Представляют собой параболическую зависимость: кривая, симметричная относительно оси абсцисс;

$P_1 = P_2 + \Sigma \Delta P = KS_n \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}$ – активная мощность первичной обмотки. Это параболическая кривая, не симметричная относительно вертикальной оси.

Каждая функция, составляющая η , изменяется по своему закону. С одной стороны, наличие активной мощности в выражении КПД значительно ограничивает его применение, так как характер нагрузки изменяется во времени ($\cos \varphi_2 \neq \text{const}$). С другой стороны, нагрев трансформатора определяется полным током, а не только его активной составляющей.

КПД, так же как и удельные потери мощности $\Sigma \Delta P_{\text{уд}}$, как критерии для оценки качества преобразования энергии, необходимо признать искусственными. Они не вытекают из исследования функций (P_1 , $\Sigma \Delta P$, P_2) напрямую. В связи с этим иногда необходимо доказывать их объективность.

Исследуя $\eta = f(K)$ на максимум, как подсказывает (1), фактически равносильно исследованию $\Sigma\Delta P_{уд} = f(K)$ на минимум. Очевидно, что чем меньше $\Sigma\Delta P_{уд}$, тем больше будет η .

Проведя исследования функций $\eta = f(K)$ и $\Sigma\Delta P_{уд} = f(K)$ на экстремум, приходим к выводу, что максимуму КПД (η) и минимуму удельных потерь мощности ($\Sigma\Delta P_{уд}$) соответствует коэффициент загрузки

$$K_{\eta} = \sqrt{\frac{\Delta P_{ст}}{\Delta P_{мн}}}. \quad (3)$$

Трактовка (3) следующая: максимум КПД в трансформаторе наступает при таком коэффициенте загрузки K_{η} , когда переменные потери мощности (в меди) равны постоянным (в стали). Соотношение же между $\Delta P_{ст}$ и $\Delta P_{мн}$ устанавливается на этапе проектирования трансформатора, т. е. величина K_{η} – фиксированная.

Подставляя в соответствующие выражения значение K_{η} , определяем величины:

- удельных потерь мощности

$$\Sigma\Delta P_{уд} = \frac{2\sqrt{\Delta P_{ст}\Delta P_{мн}}}{S_n \cos\phi_2}; \quad (4)$$

- суммарных потерь мощности

$$\Sigma\Delta P = 2\Delta P_{ст}. \quad (5)$$

С другой стороны, исследование исходной функции $\Sigma\Delta P = \Delta P_{ст} + K^2\Delta P_{мн}$ на экстремум показывает, что минимум суммарных потерь мощности равен $\Sigma\Delta P = \Delta P_{ст}$, когда $K = 0$. Таким образом, максимуму КПД соответствует минимум суммарных удельных потерь мощности, но минимум суммарных потерь мощности нет.

Авторы поиска зон оптимальной загрузки трансформатора по максимуму КПД по непонятным причинам не учли это обстоятельство. В результате достоверность полученных ими рекомендаций и выводов вызывает обоснованные сомнения. Возникает противоречие: минимум удельных потерь имеется, а минимума суммарных потерь мощности нет. В первом случае суммарные потери мощности равны $\Sigma\Delta P = 2\Delta P_{ст}$, а во втором – $\Sigma\Delta P = \Delta P_{ст}$.

Имеется ли противоречие в действительности или оно кажущееся, в результате чего возникло это противоречие?

Специфика КПД, как и других коэффициентов, заключается в том, что он, по определению, представляет собой отношение двух величин, имеющих одинаковую размерность, фигурирует как число, т. е. величина без размерности. Следовательно, суммарные потери мощности $\Sigma\Delta P$ в составе КПД представляют $\Sigma\Delta P_{уд}$. Это касается и итогов исследования функции $\eta = f(K)$, в том числе и на экстремум. В связи с изложенным совершенно

логично звучит вывод: максимум КПД соответствует минимуму удельных потерь мощности $\Sigma \Delta P_{\text{уд}}$.

Рассматривая $K^2 \Delta P_{\text{мн}}$ в выражении $\Sigma \Delta P$, необходимо учитывать следующее:

текущее значение мощности потерь в обмотках

$$\Delta P_{\text{м}} = I^2 R_{\text{к}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{к}}$ – сопротивление короткого замыкания;

текущее значение мощности потерь в обмотках при номинальном токе $I_{\text{н}}$

$$\Delta P_{\text{мн}} = I_{\text{н}}^2 R_{\text{к}}. \quad (7)$$

И в результате получаем

$$\Delta P_{\text{м}} = K^2 \Delta P_{\text{мн}}, \quad (8)$$

где $K = \frac{I}{I_{\text{н}}}$ – коэффициент загрузки трансформатора.

Зависимости вида (8), как известно, не имеют максимума, а минимум наступает при $K = 0$. Фактически речь идет о поиске оптимума выражения $I^2 R$, когда независимой переменной является ток нагрузки I .

Наличие в (1) удельных потерь мощности в виде

$$\Sigma \Delta P_{\text{уд}} = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{K} + K \Delta P_{\text{мн}} \quad (9)$$

приводит к неопределенности следующего рода.

Считаем, $\eta = \text{const}$. При этом $\Delta P_{\text{уд}} = \text{const}$, что позволяет записать соотношение

$$\frac{\Delta P_{\text{ст}}}{K_1} + K_1 \Delta P_{\text{мн}} = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{K_2} + K_2 \Delta P_{\text{мн}}. \quad (10)$$

Решаем это уравнение относительно коэффициентов загрузки и получаем

$$K_1 K_2 = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\text{мн}}}. \quad (11)$$

При $K_1 = K_2 = K$ это выражение превращается в (3). Если коэффициенты загрузки связаны данным соотношением, то трансформатор будет работать с одинаковым КПД.

Переходя к суммарным потерям мощности для каждого случая $\Sigma \Delta P_1 = \Delta P_{\text{ст}} + K_1^2 \Delta P_{\text{мн}}$ и $\Sigma \Delta P_2 = \Delta P_{\text{ст}} + K_2^2 \Delta P_{\text{мн}}$, учитывая (11), получим соотношение

$$\frac{\Sigma \Delta P_1}{K_1} = \frac{\Sigma \Delta P_2}{K_2}, \quad (12)$$

которое представляет удельные потери мощности.

Получается, что трансформатор с разными коэффициентами загрузки K , а также разными суммарными потерями мощности будет работать с одинаковым КПД, что приводит к неопределенности.

Даже при наличии построенных зависимостей $\eta = f(K)$ ими невозможно воспользоваться, так как каждому значению η соответствуют два значения K . Исключение составляет случай, когда КПД имеет максимум, т. е. при K_2 .

Эта неопределенность заложена в исходном выражении (1), в его первой части

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{KS_H \cos \varphi_2}{KS_H \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}}, \quad (13)$$

где наличие $\Sigma \Delta P_{\text{уд}}$ в явном виде не просматривается.

Вторая половина выражения (1)

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}}{KS_H \cos \varphi_2}} \quad (14)$$

подтверждает, что функция $\eta = f(K)$ есть фактически функция $\eta = f(\Sigma \Delta P_{\text{уд}})$ со всеми последствиями. Следует также заметить, что $\eta = f(\Sigma \Delta P_{\text{уд}})$ – это зависимость одной величины в относительных единицах η от другой ($\Sigma \Delta P_{\text{уд}}$) в таких же единицах, т. е. без размерности. С методической точки зрения, (13) полностью соответствует определению КПД. Фигурирует активная мощность, так как в электротехнике термин «полезная мощность» не используется.

Таким образом, привлечение КПД к оценке качества преобразования энергии в трансформаторе вызывает определенные трудности. Возможно, и по этой причине для исследования энергетических характеристик трансформатора используется зависимость $\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + K^2 \Delta P_{\text{мн}}$ в естественном виде. Исследование этой зависимости свидетельствует о том, что оптимальной загрузки трансформатора по критерию минимума суммарных потерь мощности нет и быть не может.

ВЫВОД

Учитывая характер составляющих, входящих в $\Sigma \Delta P$, а также их зависимость от коэффициента загрузки K , необходимо признать, что постановка вопроса по поиску зоны оптимальной загрузки трансформатора по минимуму суммарных потерь мощности $\Sigma \Delta P$ является некорректной.

Представлена кафедрой
электрообеспечения

Поступила 01.07.2013