

СРАВНЕНИЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6-10/0,4 кВ С РАЗНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

А.С. Вершинин, канд. техн. наук, доц.

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь*

Сравниваются технические характеристики силовых трансформаторов 10/0,4 кВ со схемами соединений обмоток Y/Y_n – звезда-звезда с нулевым проводом, Y/Z_n – звезда-зигзаг с нулевым проводом и $Y/2Z_n$ – звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом относительно материальных затрат на изготовление. В результате показано, что лучшими техническими характеристиками относительно затрат на изготовление обладает трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Z_n – звезда-зигзаг с нулевым проводом.

Ключевые слова: *силовой трансформатор, схема соединений обмоток, нулевой провод, векторная диаграмма, сопротивление линии, нагрузка, потери электроэнергии, коэффициент несимметрии, нулевая последовательность, качество электроэнергии.*

В современной электроэнергетике всегда актуальными остаются вопросы минимизации потерь электроэнергии при доставке ее к потребителю и соблюдения требований по качеству электроэнергии в распределительных сетях 6–10 кВ и 0,4 кВ.

Одной из причин увеличения потерь и снижения качества электроэнергии является подключение несимметричных нагрузок, что приводит к несимметрии напряжений в городских и сельских сетях 0,4 кВ [1].

Ослабить влияние таких нагрузок на несимметрию напряжений возможно путем применения в сетях 0,4 кВ понижающих трансформаторов с различными схемами соединения обмоток.

В настоящее время силовые трансформаторы напряжением 6–10/0,4 кВ выпускаются со следующими схемами соединений обмоток [2]:

- Y/Y_n – звезда-звезда с нулевым проводом;
- Δ/Y_n – треугольник-звезда с нулевым проводом;
- Y/Z_n – звезда-зигзаг с нулевым проводом.

Кроме того, в технической литературе описывается трансформатор со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ – звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом

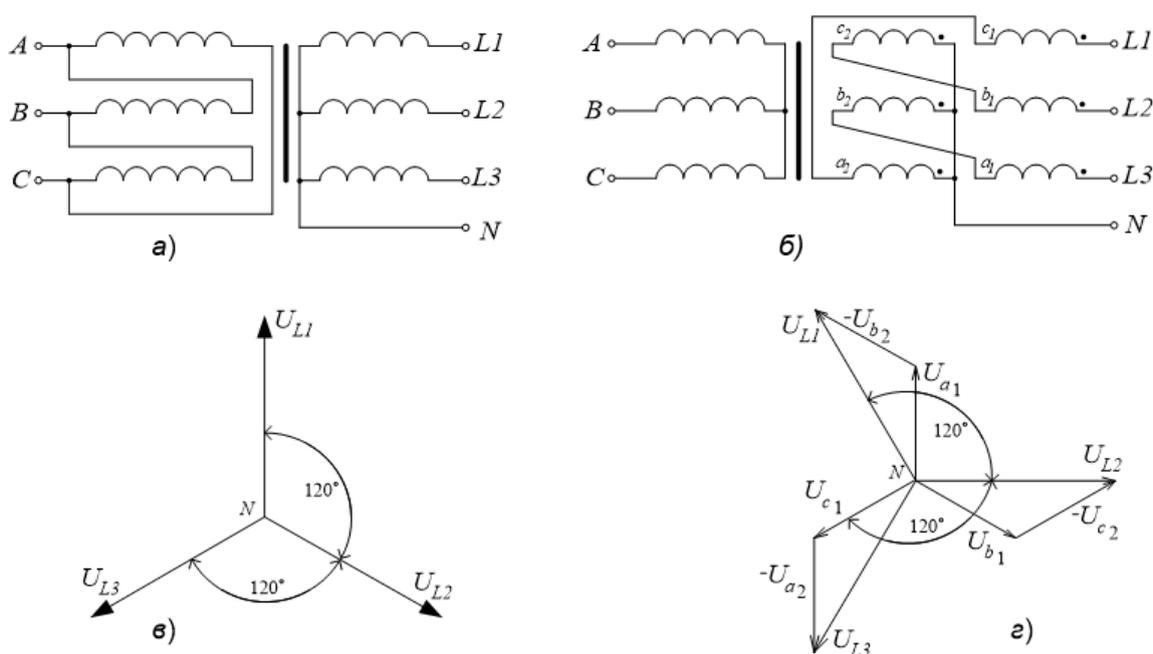
Основной целью данной работы является проведение сравнительного анализа характеристик трансформаторов с разными схемами соединения обмоток и выбор трансформатора с меньшими значениями потерь энергии, коэффициентов несимметрии и по возможности меньшими затратами.

Трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y_n обычно используют для питания симметричных нагрузок [2]. Они получили наибольшее распространение, невзирая

на то, что при значительной однофазной нагрузке нейтраль сильнее смещается, нарушается симметрия напряжений, увеличиваются потери в линиях и трансформаторе и появляется дополнительный нагрев трансформатора магнитными потоками нулевой последовательности, которые замыкаются через бак. Но зато такие трансформаторы дешевле.

Для питания несимметричных нагрузок лучше подходят трансформаторы со схемами соединения обмоток (Δ/Y_n , Y/Z_n и $Y/2Z_n$). Поэтому сравнение характеристик трансформаторов при несимметричной нагрузке будем производить только для этих трех схем. Важным различием в трансформаторах с разными схемами соединения обмоток являются различные сопротивления нулевой последовательности [1].

Сравним свойства и параметры трансформаторов со схемами соединения Δ/Y_n и Y/Z_n . Схемы соединения обмоток этих трансформаторов и векторные диаграммы ЭДС вторичных обмоток приведены на рис. 1.



а – треугольник-звезда с нулевым проводом; **б** – звезда-зигзаг с нулевым проводом;
в – векторная диаграмма вторичных ЭДС трансформатора Δ/Y_n ;
г – векторная диаграмма вторичных ЭДС трансформатора Y/Z_n

Рисунок 1. –Схемы соединения обмоток трансформаторов 6-10/0,4 кВ.

Так трансформатор со схемой соединения обмоток Δ/Y_n даже при номинальной однофазной нагрузке незначительно искажает напряжение (снижает напряжение в нагруженной фазе примерно на 10–12 % без искажения фазовых сдвигов, а коэффициенты несимметрии вторичных напряжений по обратной и по нулевой последовательности увеличиваются примерно до значений $k_{2U} \approx 4,75\%$ и $k_{0U} \approx 9,64\%$) [1]. Но соединение первичных обмоток в треугольник дороже, по сравнению с соединением в звезду, так как обмотки рассчитываются на линейное напряжение, и потому число витков в каждой первичной обмотке в $\sqrt{3}$ раз больше. Кроме того, для размещения большего количества витков приходится увеличивать размеры окна в магнитопроводе, а следовательно, увеличиваются его размеры. Также увеличивается трудоемкость изготовления.

Конечно, трансформатор с обмотками Δ/Y_n по своим свойствам лучше противостоит несимметричным нагрузкам по сравнению с трансформатором Y/Y_n , но значительно дороже.

Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Z_n по своим свойствам заметно превосходит трансформатор с обмотками Δ/Y_n . Применение трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Z_n позволяет питать мощные однофазные нагрузки без ухудшения качества электроэнергии [1]. И, кроме того, снижаются потери в самом трансформаторе при значительной несимметрии нагрузки [1].

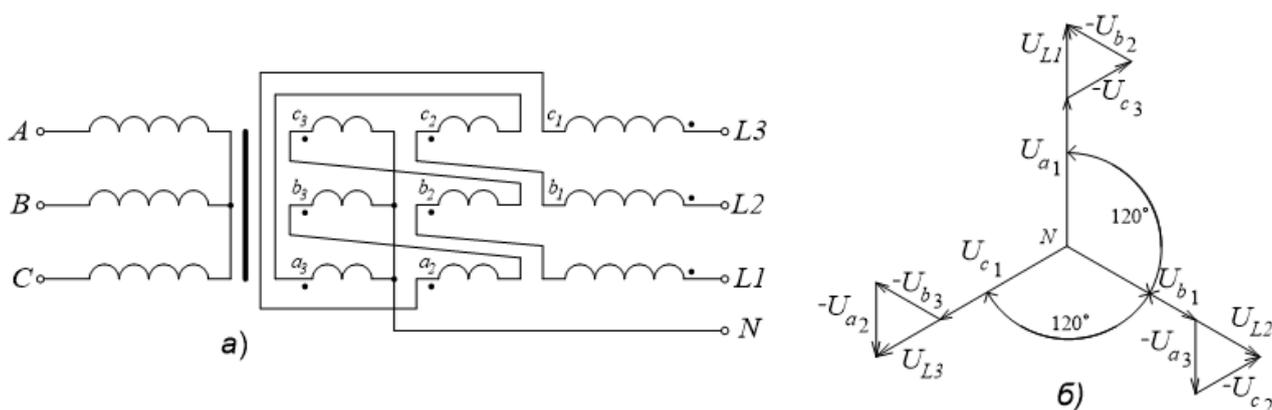
Так в [3, 4] приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов несимметрии вторичных напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Z_n в режиме однофазной нагрузки: ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2I_n$, а в двух других фазах был равен нулю. С ростом тока в нагруженной фазе оба коэффициента несимметрии вторичных напряжений растут, и при максимальном значении тока достигают значений $k_{2U} \approx 2,3\%$ и $k_{0U} \approx 4,0\%$. Отсюда видно, что коэффициенты несимметрии вторичных напряжений в трансформаторе с обмотками Y/Z_n практически в 2 раза меньше, чем в трансформаторе с обмотками Δ/Y_n . Кроме того в [1] показано, что в трансформаторе с обмотками Y/Z_n имеет место небольшое, но все же снижение потерь энергии по сравнению с трансформатором с обмотками Δ/Y_n в режиме однофазной нагрузки.

Еще одним положительным свойством трансформатора с обмотками Y/Z_n является отсутствие магнитных потоков нулевой последовательности, дополнительно разогревающих бак трансформатора. Это объясняется тем, что в таком трансформаторе устраняются токи нулевой последовательности во вторичных обмотках за счет расщепления обмоток фаз, размещенных на разных стержнях сердечника [5] (рис. 16).

Сравнение материальных затрат на изготовление трансформаторов со схемами соединения обмоток Δ/Y_n и Y/Z_n показывает, что они близки. Так в трансформаторе с обмотками Y/Z_n количество витков первичных обмоток в $\sqrt{3}$ раз меньше, так как они рассчитываются на фазные напряжения, но зато количество витков во вторичных обмотках на 15 % больше, чем в трансформаторе с обмотками Δ/Y_n . Это видно из векторной диаграммы (рис. 1а), так как сумма модулей векторов вторичных напряжений полуфаз на 15 % больше, чем модуль вектора получаемого вторичного фазного напряжения. И поскольку сечение провода вторичных обмоток больше, чем в первичных, то расход намоточных материалов можно считать близким. При этом затраты на изготовление магнитопровода также будут близки.

Таким образом трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Z_n обладает лучшими техническими характеристиками по сравнению с трансформатором со схемой соединения обмоток Δ/Y_n при близкой стоимости.

Далее рассмотрим свойства и параметры трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/2Z_n$ – звезда-двойной зигзаг. Схема соединения обмоток этого трансформатора и векторная диаграммы ЭДС вторичных обмоток приведены на рис. 2 [6, 7].



а – схема соединений звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом;

б – векторная диаграмма вторичных ЭДС трансформатора Y/2Zn

Рисунок 2. –Схема соединения обмоток трансформатора Y/2Zn 6-10/0,4 кВ

По своим техническим характеристикам трансформатор со схемой соединения обмоток Y/2Zn превосходит трансформатор с обмотками Y/Zn [4, 6, 7]. В нем также отсутствуют магнитные потоки нулевой последовательности, он в большей мере ослабляет несимметрию вторичных напряжений. Поскольку вторичное напряжение каждой фазы трансформатора складывается из трех составляющих от обмоток (рис. 2а), то сумма модулей векторов составляющих напряжений получится на 25% больше модуля вектора фазного напряжения (рис. 2б) [6]. Поэтому потери ΔP_k несколько возрастут.

Оценим степень ослабления несимметрии вторичных напряжений трансформатора с обмотками Y/2Zn по сравнению с трансформатором с обмотками Y/Zn. В [4] приведены результаты экспериментальных исследований коэффициентов несимметрии вторичных напряжений по обратной и нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения обмоток Y/2Zn в режиме однофазной нагрузки: ток в одной из фаз изменялся в пределах от 0 до $1,2I_n$, а в двух других фазах был равен нулю. С ростом тока в нагруженной фазе оба коэффициента несимметрии вторичных напряжений также растут, и достигают значений $k_{2U} \approx 1,95\%$ и $k_{0U} \approx 3,4\%$.

Сравнивая коэффициенты несимметрии вторичных напряжений трансформаторов с обмотками Y/2Zn и Y/Zn при несимметричной однофазной нагрузке видно, что у трансформатора с соединением обмоток Y/2Zn коэффициент несимметрии по обратной последовательности k_{2U} на 0,35 % меньше, а коэффициент несимметрии по нулевой последовательности k_{0U} на 0,6 % меньше. Отсюда видно, что у рассматриваемого трансформатора свойство снижать несимметрию вторичных напряжений сравнительно невелико по сравнению с трансформатором с соединением обмоток Y/Zn.

Но при этом затраты на изготовление трансформатора со схемой соединения обмоток вашего сравнению с трансформатором с обмотками Y/Zn. Поскольку каждая фаза вторичного напряжения содержит на 25 % витков больше [6], по сравнению обмотками Y/Zn, то надо увеличить окно магнитопровода, а значит увеличить и его размеры. В итоге по сравнению с трансформатором с обмотками Y/Zn примерно на 10 % увеличиваются расходы намоточные материалы, и добавляются расходы на увеличение размеров магнитопровода. Кроме того, увеличивается трудоемкость изготовления вторичных обмоток.

Таким образом стоимость трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/2Zn$ выше трансформатора с обмотками Y/Zn , а получаемый положительный эффект сравнительно невелик. Конечно, трансформатор с обмотками $Y/2Zn$ имеет нулевую группу соединения обмоток, что позволяет включать их на параллельную работу с трансформаторами со схемой соединения обмоток Y/Yn для увеличения мощности [6], но это встречается не так часто.

Выводы. В результате проведенного сравнительного анализа свойств и характеристик силовых трансформаторов 6-10/0,4 кВ со схемами соединения обмоток Δ/Yn , Y/Zn и $Y/2Zn$ для питания несимметричных нагрузок лучшими технико-экономическими показателями обладает трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Zn – звезда-зигзаг с нулевым проводом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулеев, М. А. Преимущества применения трансформаторов со схемой соединения «звезда-зигзаг» / М. А. Сулеев, К. Р. Валиуллин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). – Екатеринбург : УрФУ, 2017. – С. 385–388.
2. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М., 1990.
3. Распределительные трансформаторы 6 (10) кВ. Проблема качества электрической энергии в сетях 0,4 кВ. Исследование несимметричной работы трансформаторов / ОАО «АлТранс» [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.alttrans.ru> (дата обращения 5.03.2017).
4. Прищепов, М. А. Экспериментальные исследования работы трансформаторов со схемами соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» и «звезда-зигзаг» при несимметричной нагрузке / М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга // Энергосбережение важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы международной научно-технической конференции (Минск, 19–20 декабря 2019 года) : под ред. И. В. Протосовицкого. – Минск : БГАТУ, 2019. – 324 с. – С. 42–45.
5. Рудых, А.В. Оптимальное соотношение чисел витков полуфаз вторичных обмоток трансформатора со схемой зигзаг с нулем // Международный журнал гуманитарных и естественных наук: Технические науки, т. 3-2(66), С. 148–151, 2022.
6. Прищепов, М. А. Перспективный силовой трансформатор с улучшенными характеристиками для сельских электрических сетей / М. А. Прищепов, А. И. Зеленкевич, В. М. Збродыга // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 355–366.
7. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.