

УДК 629.1.04

ВЛИЯНИЕ СЕТИ НА РЕАКТИВНУЮ МОЩНОСТЬ*И.П. Попов**Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2023

Аннотация. Изложены результаты оценки влияния каскада трансформаторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке. Представлен ряд важных выводов: в рассмотренной схеме при симметричной нагрузке происходит самокомпенсация реактивной мощности; если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части; поток реактивной мощности на внешнем участке в три раза меньше, чем на внутреннем. Указано, что в реальной сети из-за вышеперечисленных обстоятельств поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается с увеличением числа трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: осциллятор, энергия, колебания, реактивная мощность, фаза, каскад, трансформатор, сеть, симметричная нагрузка.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60**ВВЕДЕНИЕ**

Реактивная мощность в сети является нежелательным явлением. Ее циркуляция по проводам вызывает тепловые потери, равные приблизительно 10 % ее величины. Для ее снижения используют дорогостоящие статические и динамические компенсаторы.

Цель работы – установление явления сокращения потока реактивной мощности в сети с трансформаторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Самокомпенсация реактивной мощности при симметричной нагрузке. На рис. 1 представлена идеальная схема подключения вторичных обмоток трансформатора к симметричной индуктивной нагрузке. Сопротивления рассеяния не показаны [1–4]. Активные составляющие сопротивлений не рассматриваются. Реактивная мощность в сеть не передается (гипотетически).

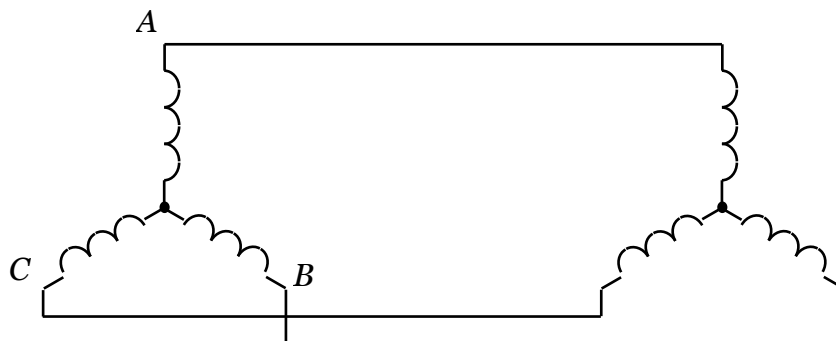


Рис. 1. Самокомпенсация реактивной мощности

В части опосредованного взаимодействия магнитного поля с нагрузкой схема неотличима от комплекса, в котором вместо трансформатора использована синхронная явнополюсная машина [5–6]; в этом комплексе источником возбуждения колебаний тока (индуктивного) в любой фазе являются другие (другая) фазы (фаза) нагрузки [7–9].

Подобное явление самокомпенсации реактивной мощности известно и в механических системах [10–12].

Мгновенные токи i_A, i_B, i_C напряжения u_A, u_B, u_C и мощности (реактивные) q_A, q_B, q_C фаз:

$$\begin{aligned}i_A &= I_m \sin \omega t; \\u_A &= I_m \omega L \cos \omega t; \\q_A &= I_m^2 \omega L \sin \omega t \cos \omega t = 0,5 I_m^2 \omega L \sin 2\omega t; \\i_B &= I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\u_B &= I_m \omega L \cos(\omega t - 2\pi/3); \\q_B &= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t - 4\pi/3); \\&= I_m \sin(\omega t + 2\pi/3); \\u_C &= I_m \omega L \cos(\omega t + 2\pi/3); \\q_C &= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t + 4\pi/3),\end{aligned}$$

где L – суммарная индуктивность фазы трансформатора (включая рассеяние) и нагрузки; I_m – амплитуда тока; ω – частота; t – время.

Сумма мощностей фаз B и C

$$\begin{aligned}q_{BC} &= q_B + q_C = \\&= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t - 4\pi/3) + 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t + 4\pi/3) = \\&= 2 \cdot 0,5 I_m^2 \omega L \sin[(2\omega t - 4\pi/3 + 2\omega t + 4\pi/3)/2] \cos[(2\omega t - 4\pi/3 - 2\omega t - 4\pi/3)/2] = \\&= I_m^2 \omega L \sin 2\omega t \cos(-4\pi/3) = \\&= -0,5 I_m^2 \omega L \sin 2\omega t.\end{aligned}$$

Полученная величина противоположна мощности фазы A :

$$q_B + q_C = -q_A.$$

Это означает, что при оговоренных условиях фазы нагрузки совершают между собой обмен реактивной энергией. Следовательно, имеет место самонейтрализация реактивного характера нагрузки.

Замечание о мощностях фаз. Может показаться, что соотношение $q_B + q_C = -q_A$ тривиально и обусловлено симметрией трехфазной схемы. Из аналогичных соотношений для мгновенной мощности p_A, p_B, p_C при идеально активной нагрузке видно, что это не так. Действительно:

$$\begin{aligned}p_A &= I_m^2 R \cos^2 \omega t = \\&= 0,5 I_m^2 R (1 + \cos 2\omega t) = \\&= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos 2\omega t; \\p_B &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t - 4\pi/3); \\p_C &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t + 4\pi/3); \\p_B + p_C &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t - 4\pi/3) + 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t + 4\pi/3) = \\&= I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R [\cos 2\omega t \cos(4\pi/3) + \sin 2\omega t \sin(4\pi/3)] + \\&\quad + 0,5 I_m^2 R [\cos 2\omega t \cos(4\pi/3) - \sin 2\omega t \sin(4\pi/3)] = \\&= I_m^2 R - 0,5 I_m^2 R \cdot 0,5 \cos 2\omega t - 0,5 I_m^2 R \cdot 0,5 \cos 2\omega t = \\&= I_m^2 R - 0,5 I_m^2 R \cos 2\omega t; \\p_B + p_C &\neq -p_A.\end{aligned}$$

Потоки реактивной мощности в последовательности трансформаторов. На рис. 2 показан ряд трансформаторов или шунтирующих реакторов с реактивной нагрузкой. Идеализация этой схемы меньше, чем первой, поскольку реактивная мощность второго и третьего трансформаторов передается в первичную обмотку.

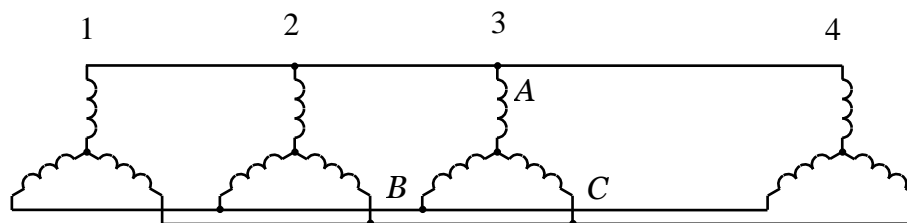


Рис. 2. Ряд трансформаторов: 1–4 – номера участков

Если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части, поэтому поток реактивной мощности на внешнем участке в три раза меньше, чем на внутреннем. В соответствии с этим в реальной сети с ростом числа трансформаторных подстанций поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается.

Значения потоков реактивной мощности в участках сети, отнесенные к величине потока через нагрузку, представлены ниже:

Участок сети	1–2	2–3	3–4
Относительный поток реактивной мощности	1/3	2/3	1

До сих пор считалось, что реактивная мощность не перетекает между фазами, поэтому ее поток *без изменения* циркулирует между нагрузкой и источником (генератором) (при условии отсутствия средств компенсации).

Согласно рис. 2 поток на участке 3–4 остался без изменений по сравнению с прежними воззрениями. Однако уже на участке 2–3 он составляет 2/3 от его значения для нагрузки, а на участке 1–2 – 1/3.

Каждый последующий трансформатор по мере удаления от нагрузки *шунтирует* часть потока реактивной мощности, поэтому в источнике (генераторе) реактивная мощность существенно меньше, чем в нагрузке. Соответственно уменьшается усредненный поток реактивной мощности, циркулирующий в сети.

Поскольку снижение усредненного потока реактивной мощности происходит без применения специальных средств компенсации, то это явление можно считать самокомпенсацией реактивной мощности. В качестве технических средств, обеспечивающих такой реактивный энергообмен, могут выступать *уже имеющиеся* в сети трансформаторы и шунтирующие реакторы. В этом смысле достигаемое таким образом снижение потока реактивной мощности является *естественным*, т.е. не специально организованным, как в случае с синхронными компенсаторами и конденсаторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ориентируясь на изложенные выше соображения, можно сделать вывод, что имеет место явление сокращения потока реактивной мощности в сети с трансформаторами. Полученные аналитические выражения и сделанные выводы не накладывают ограничений на классы напряжения силовых трансформаторов и типы электроэнергетических систем, электрических сетей, в которых они размещаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popov I.P. Methods for determining the scattering reactance of transformer windings // *Russian Electrical Engineering*. 2021. Vol. 92. № 1. Pp. 46–49.
2. Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 81–88.
3. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // *Автоматизированные технологии и производства*. 2021. № 2 (24). С. 11–13.
4. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода короткого замыкания для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // *Автоматизированные технологии и производства*. 2022. № 1 (25). С. 14–16.
5. Попов И.П. Теоретически установленная независимость амплитуд тока и момента синхронной машины с индуктивной нагрузкой от частоты // *Вестник МЭИ*. 2019. № 5. С. 68–72.
6. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
7. Попов И.П. Трииндуктивный осциллятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 50–55.
8. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Индуктивно-индуктивная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2013. Вып. 8. № 2 (29). С. 78–79.
9. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Емкостно-емкостная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2014. Вып. 9. № 2 (33). С. 21–23.
10. Попов И.П. Теория мультиинертного осциллятора // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2020. № 1. С. 88–91.
11. Попов И.П. Свободные гармонические колебания без использования потенциальной энергии // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2022. № 4 (156). С. 9–12.
12. Попов И.П. Двухмассовый осциллятор // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2022. № 12. С. 558–560.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: ip.porow@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 55–60.

NETWORK INFLUENCE ON REACTIVE POWER

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The results of the evaluation of the influence of the transformer cascade on the reactive power in the network under symmetrical load are presented. A number of important conclusions are presented: in the considered scheme, with a symmetrical load, reactive power self-compensates; if the transformers are identical, then the reactive power flow from the load is divided between them into equal parts; the reactive power flow in the external section is three times less than in the internal one. It is indicated that in a real network, due to the above circumstances, the reactive power flow decreases significantly with an increase in the number of transformer substations as it moves away from the load.

Keywords: oscillator, energy, oscillations, reactive power, phase, cascade, transformer, network, symmetrical load.

REFERENCES

1. Popov I.P. Amplitude-frequency features of load modes of a synchronous electric machine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. № 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
2. Popov I.P. Methods for determining the scattering reactance of transformer windings. *Russian Electrical Engineering*. 2021. Vol. 92. No. 1, pp. 46–49. (In Russian).
3. Popov I.P. Flux leakage in transformers. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 81–88. (In Russian).
4. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision method of idling for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2021. No. 2 (24), pp. 11–13. (In Russian).
5. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2022. No. 1 (25), pp. 14–16. (In Russian).

6. Popov I.P. Theoretically established independence of the amplitudes of the current and torque of a synchronous machine with an inductive load on frequency. *Vestnik MEI*. 2019. No. 5, pp. 68–72. (In Russian).
7. Popov I.P. Amplitude-frequency features of load modes of a synchronous electric machine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
8. Popov I.P. Triinductive oscillator. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2022. No. 1 (13), pp. 50–55. (In Russian).
9. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Inductive-inductive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2013. Iss. 8. No. 2 (29), pp. 78–79. (In Russian).
10. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Capacitive-capacitive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2014. Iss. 9. No. 2 (33), pp. 21–23. (In Russian).
11. Popov I.P. Theory of a multi-inert oscillator. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*. 2020. No. 1, pp. 88–91. (In Russian).
12. Popov I.P. Free harmonic oscillations without the use of potential energy. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2022. No. 4 (156), pp. 9–12. (In Russian).
13. Popov I.P. Two-mass oscillator. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*. 2022. No. 12, pp. 558–560. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – senior lecturer of the department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments, FSBEI HE «Kurgan State University», 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: ip.popow@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Network influence on reactive power // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 55–60.