

Circular flow development processes in transmission power networks

Author

Stanisław Ziemianek

Keywords

circular flows, phase-shifting transformers, power flow tracing, transmission network, power systems

Abstract

This paper describes the mechanism of sequential formation of circular flows in transmission power networks. These flows are detected by a method of automatic identification of circular flows in a meshed transmission network – based on application of the power flows tracing theory.

Matrices built in power flows tracing are reviewed, which in each node tie up the power flow with the power generated (or received). This method is very effective.

It was used to analyze the seemingly abrupt appearance of circular flows in a meshed transmission network. Some regularities are observed in the appearances of these flows in transmission networks. These are discussed in the example of the known IEEE 118 system.

1. Introduction

In a meshed transmission network circular flows of active and/or reactive power may appear. An active power circular flow can develop as a result of the impact of phase-shifting transformer units (PST) with phase angle (and FACTS technology elements that are their functional extension). Phase-shifting set contribute to the proper distribution of active power between various network branches. Where coordination of such phase shifters' ratios is missing (or the interests of individual sub-system/network area operators are divergent) in network meshes, active power circulation may occur that occupies the network cross sections and reduces ratios such as ATC, TTC, etc., i.e. decreases the transmission network capability and increases the network losses.

Circular flows can be identified using the inspection technique, and then the phase angle of PST can be appropriately adjusted, the network configuration changed, the generation profiles corrected, etc. This issue has been thoroughly studied (comprehensive review of these studies, e.g. in [1, 4, 5]). The methods and solutions developed in this way have their own advantages and disadvantages and origin, for example derived from graph theory or linear algebra. It is widely believed that this is a difficult task.

A very effective method for circular flow identification has been developed [2, 5, 6, 7, 8] using active power flow tracing

procedures (subject to the proportionality principle). The method is based on the fact that, as a result of superimposition of the share rates of powers generated in each node (or received by it), at a circular flow occurrence a portion of such power reappears in the node flow. Where measurements (WAMS, state vector estimation) are available, corresponding distribution matrices are developed and the power flow tracing procedures are followed [8]. An outline of such a methodology is presented below.

2. Outline of the method

The following procedure leads to the identification of active power circular flows:

Create a matrix of the $A_p^{l\leftarrow}$ or $A_p^{l\rightarrow}$ type (as per [8]). Let's assume that matrix $A_p^{l\leftarrow}$ has been chosen.

It appears as the following relation:

$$P_G = A_p^{l\leftarrow} \cdot P^{\Rightarrow}$$

where:

P_G – vector of power generated in nodes

P^{\Rightarrow} – vector of central active power flows in each node, for example, half of the total of node power modules (branch powers, local generation, local power consumption).

Using the sparse matrix technique obtain the inversion of matrix $A_p^{k<}$ (its diagonal will suffice too) – the following will be obtained:

$$P^{\Rightarrow} = A_p^{k<-1} \cdot P_G$$

Review the diagonal of matrix $A_p^{k<-1}$ and if element a_{ii} on its main diagonal is more than 1: $a_{ii} > 1, i \in C$, then through node i flows a circular flow, where C – set of nodes from $a_{ii} > 1$, i.e. set of the vertices on which edges of the graph containing the cycles are spread.

Find out which of the branches between the nodes carry the circular flow; this is not difficult. If there was a multi-circuit branch in the network, each of them should be initially treated as a single substitute, and then these cases should be viewed as typical. If there are multiple circular flows in the network, then following the level of each a_{ii} the network area may be initially narrowed to these segments, and the segments may be grouped according to the levels of a_{ii} . Find out in each segment which of the branches between the segment's nodes carry the circular flow; this is not difficult.

Also the matrix of node powers distribution in relation to branches may be used, that is, equations of the following type:

$$P^{\rightarrow} = D_{\rightarrow G_p} \cdot P_G$$

where:

P^{\rightarrow} – vector of branch powers

If power $P_{i \rightarrow j}$ in branch i - j flows from node i to node j , and the source (real or potential) in node j has its share in it, there is a circular flow carried by this branch.

Values of each a_{ii} will depend on the circular flow power and on the branch powers' ratios to the nodal flows in branches and nodes that carry circular flow. The greater the circular flow power and the ratios of branch powers to nodal flows in the circular flow carrying branches and nodes, the greater will be a_{ii} too. Related to this is, that a_{ii} will be greater, if the circular flows carrying network meshes are tighter.

In real cases, the surplus of a_{ii} over 1 is in the order of a few or a dozen hundredths. Matrix $A_p^{k<}$ is typically (in real network conditions) very well conditioned.

In a case of superimposition of several phase shifters, elements a_{ii} on the main diagonal of matrix $A_p^{k<-1}$ have distinctive levels associated with the individual network areas under the impact of the local phase shifter.

From a general point of view, for each of the observed individual circular flows typical a_{ii} may differ. Characteristic summing up is seen ([5]) of the excess shares in the nodes, in which individual circular flows overlap.

It can be noted ([5]) that only the rows and columns of matrix $A_p^{k<-1}$, corresponding to the nodes that carry circular flow – elements a_{ij} outside the main diagonal can be in excess of 1 (because real network branches do not generate active power – typically $a_{ij} < 1$).

Circular flow development is of particular importance in cross-border flows. It also may be considered from the point of view of penetration of generation and demand profiles in the course of processes occurring on the electricity market.

Of distinctive relevance are pseudo-circular flows, when network equivalents are applied for network segments.

It is a very complex subject, but the main objective of this paper is to present processes of circular flow formation while the phase angle of a selected phase shifter is forced, and seemingly abrupt expansion of the power system's circular flow carrying area. This will be shown in the next chapter, using an example of IEEE 118 test system ([3]).

3. Circular flow development processes on the example of IEEE 118 system

IEEE 118 test network diagram [3] and the location of phase-shifting transformer PST T51_(B38 – B37) is shown in fig. 1.

At the neutral setting there are no circular flows in the network.

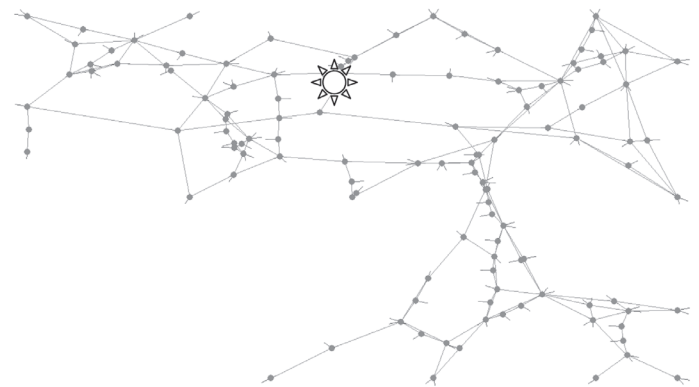


Fig. 1. IEEE 118 test network diagram and location of PST T51_(B38 – B37) phase-shifting transformer

Active power variability in branches within an area in which circular flows can develop is presented in fig. 2; these are changes in a function of PST T51_(B38-B37) phase angle.

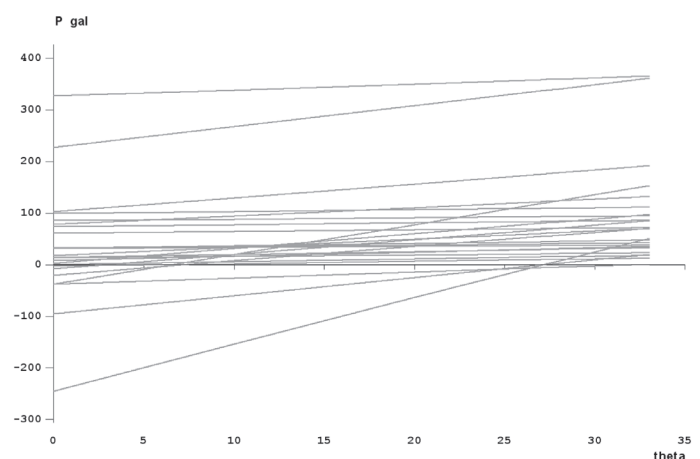


Fig. 2. Active power variability (sketch) in branches within an area, where circular flows can develop – as a function of PST T51_(B38-B37) phase angle

Characteristic is an almost linear response of the branch active powers to changes in PST phase angle in the range of 0 to 30 degrees.

While PST phase angle changes from 0 to 10 degrees, the directions of branch power flows in the four lines selected in fig. 3, i.e. L45_(B19-B34), L54_(B38-B30), L48_(B33-B37), L18_(B13-B15) are (one after another) reversing (a branch power change can be inclined at the rate of a few MW per one degree of PST phase angle (in the example a maximum of 10 MW per degree was noted).

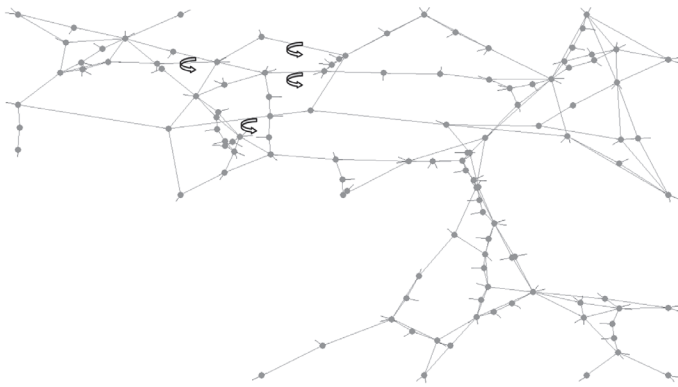


Fig. 3. Branch power flow directions reversing at a change in PST phase angle from 0 to 10 degrees in four selected lines L45_(B19-B34), L54_(B38-B30), L48_(B33-B37), L18_(B13-B15)

At a further increase of PST phase angle – to ca. 28 degrees, power P in PST is passing zero and reversing (this power's sensitivity is ca. 3.5 MW per degree), while power P in critical line L50_(B34-B37), connected with the upper PST node (this power's sensitivity is much higher – ca. 10 MW per degree), as in fig. 4.

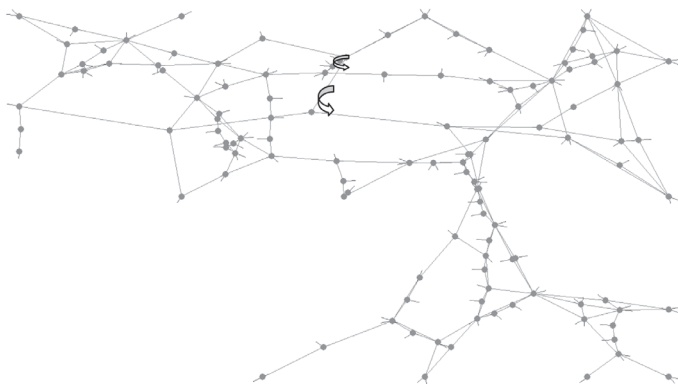


Fig. 4. Reversing branch power flow directions at PST phase angle of ca. 28 degrees in transformer T51_(B38-B37) and selected critical line L50_(B34-B37)

In the circular flow development process these two branches are sufficient to form a cyclic graph – in this case of several meshes of power P circulation, as in fig. 5 (branches marked in red, PST branch bold).

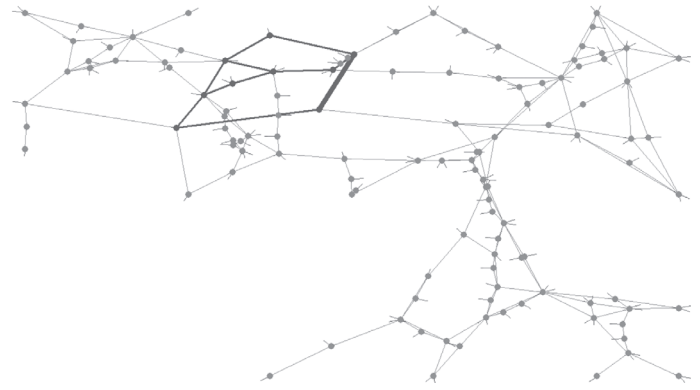


Fig. 5. Cyclic graph location in circular flow development process – in this case of several meshes of power P circulation (branches marked in red, PST branch bold)

At a further increase of PST phase angle by a subsequent 5 degrees – power P in line L37_(B30-B8) is passing zero and reversing, as in fig. 6 (this line's sensitivity to PST ratio change is low – only ca. 1 MW per degree).

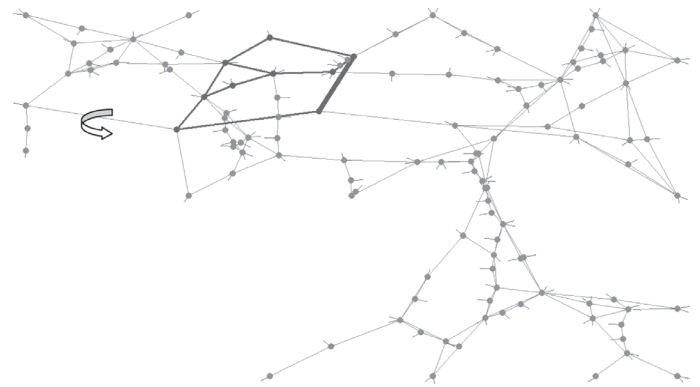


Fig. 6. Location of another branch of line L37_(B30-B8), in which power P is reversing at increase in PST phase angle by a subsequent 5 degrees

Reversal of power flow in this branch is sufficient to significantly expand the area covered by the cyclical graphs – in this case the subsequent few meshes of power P circulation, as in fig. 7.



Fig. 7. Cyclical graph expansion to another area (other branches) in circulation flow development process (PST phase angle ca. 33 degrees)

Circular flows at PST phase angle ca. 33 degrees already cover a significant portion of the network – 24 branches.

Branch powers in monitored branches at zero (neutral) PST setting were in the order of ± 300 MW. At the extreme PST setting they are in the range of 0 to 350 MW.

PST power changed only by ca. 120 MW.

Fig. 8 presents (enlarged relative to fig. 2) powers in the said 24 circular flow carrying branches. Branches are marked in which branch power flows are reversed. The role of the two break-through points may be highlighted, when the branch powers of T51_(B38-B37) transformer and L50_(B34-B37) line are reversing, and when the branch power in L37_(B30-B8) line is reversing.

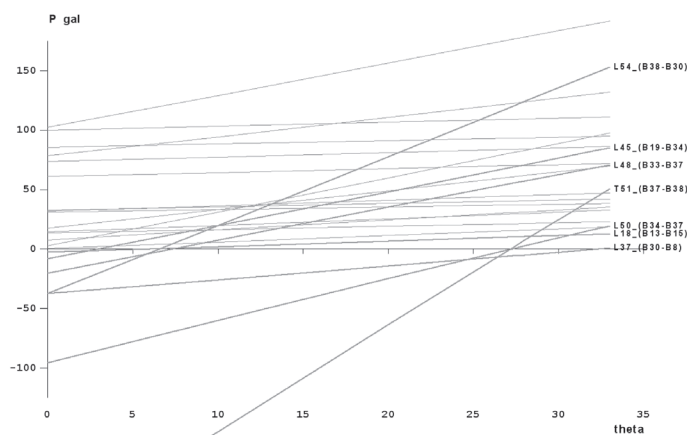


Fig. 8. Powers in circular flow carrying branches (branches are marked, in which powers are reversing)

Adding of more and more new branches to the circular flow area is characteristic. In a natural way, branches less and less sensitive to changes in PST phase angle are often situated on the edge of the area.

In the process of circular flow area extension, power losses across the network grew by 30% at 28 degrees PST setting, and at 34 degrees setting they increased by 39% (compared to the baseline at zero PST phase angle). So increased power losses can be treated as the price at which the more desirable proportions of branch powers are obtained (or elimination of transmission capability excesses in critical branches and/or network cross sections).

However, yet another, and even greater, threat is throttling of this transmission capability by circular power (flow) occupying these critical branches' cross sections. Monitoring and eliminating such cases is an important task for power system operators and automatic controls. Due to lack of responsibility of generation source and complex load operators in evoking circular flows – the task of circular flow elimination is assigned to the transmission network operator.

4. Generalisations and extensions

Due to the limited formula of topic presentation, no cases are shown here of further expansion of the circular flow carrying area in the above example. Assuming that subsequent

transformers in the IEEE 118 test network are phase shifters – superimposition of circular flow carrying areas can be accomplished, until almost all the entire network is covered by them (this is, of course, a purely theoretical case). Circular flow detection proceeds in the same way as for the variant with single PST.

If, however, the issue is considered on the broader plane of real power system network, then a sufficiently strong PST located near the system's borders can induce a significant transit, which may even include all interconnection branches (the author has studied this issue using a sensitivity analysis-based approach). This does not necessarily cause circular flows (these may be normal parallel flows). If, however, to consider that from the point of view of an observer, who records only the power flows in inter-system terms (and the interiors of individual systems are artificial equivalents) – these powers form a cycle, then the negatives of such pseudo circular flows will be similar (limited interconnection transmission capability). On this basis the circular flow concept can be extended to pseudo-circulation (in the image of interbank cash flows undertaken in bad faith). The presented method (with some extensions) is suitable for diagnosis of such cases as well.

5. Summary

Benefitting from the natural properties of the power flow tracing method – subject to the principle of proportionality – the circular flows that can possibly develop in network meshes may be identified in an automated and convenient way.

Matrices are used that have been built in tracing power flows are reviewed, which in each node tie up the power flow with the power generated (or received). These matrices are sparse and almost triangular – they have a structure based on a subset of the nodal admittance matrix elements. Convenient inversion of these matrices typically produces also sparse and almost triangular inverse matrices. This process is not very time-consuming, and all that is required is to obtain the diagonal of one of those matrices and to review it.

This paper (in the example of the IEEE 118 test system) presents the subsequent stages of circular flow development at a change of the phase angle of one of the transformers. You can see the seemingly abrupt expansion of the system's circular flow carrying area can be observed. Branch power flow reversal in another critical branch results in extension of the circular flow carrying area, often involving a group of several branches. In each of these branches the circular power decreases the available transmission capacity. Power circulation can be eliminated, following decisions developed on the basis of economic premises (available transmission capacity, respecting or reducing costs that increase network losses, levels of marginal electricity prices). On these grounds it may be decided whether to: eliminate, already eliminate or not eliminate?

The paper also presents typical levels of branch powers' sensitivity to changes in the PST phase angle. Graphs of the branch powers' responses to the transformer phase angle changes are presented. Almost linear dependence of these powers on the ratio is characteristic (the baseline status of IEEE 118 test system steady state was not very overstrained).

REFERENCES

1. Achayuthakan C., Dent C. J., Bialek J. W., Ongsakul W., Electricity Tracing in Systems With and Without Circulating Flows: Physical Insights and Mathematical Proofs, *IEEE Trans. Power Systems*, May 2010, Vol. 25, Issue 2, pp. 1078–1087.
 2. Bialek J.W., Tracing the flow of electricity, *IEEE Proc. Gen. Transm. Distrib.*, July 1996, Vol. 143, pp. 313–320.
 3. IEEE 118 test system, www.ee.washington.edu University.
 4. Wei P., Ni Y., Wu F.F., Load flow tracing in power systems with circulating power, *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier, 2002, no 24, pp. 807–813.
 5. Ziemianek S., Bialek J.W., Identification of Circular Flows in Transmission Networks using the Electricity Tracing Methodology, Power System Computation Conference – PSCC 2008, Glasgow UK.
 6. Ziemianek S., Wybrane zastosowania metody śledzenia przepływów mocy czynnej i biernej w analizach stanów pracy ustalonej systemu elektroenergetycznego [Selected applications of the active and reactive power flows tracing in analysis of power system's steady operating state], Vol. 1, APE Conference 2007, Jurata, pp. 22–31.
 7. Ziemianek S., Przepływy cyrkulujące mocy czynnej i biernej w nowoczesnej, oczkowej sieci przesyłowej – identyfikacja, wpływ, granice tolerancji [Circulating active and reactive power flows in a modern meshed transmission network – identification, impact, tolerance limits], Study in Acts Stat., IE PW, Warsaw 2009.
 8. Ziemianek S., Metody śledzenia przepływów w sieciach elektroenergetycznych w zastosowaniu do analiz techniczno-ekonomicznych [Methods of flow tracing in power networks as applied to technical and economic analyses], OWPW, 2008.
-

Stanisław Ziemianek

Warsaw University of Technology

e-mail: stanislaw.ziemianek@ien.pw.edu.pl

A life-time employee of the Institute of Electrical Power Engineering, Warsaw University of Technology. His scientific interests include the creation of mathematical models and determination and analysis of operating states in electrical power systems and grids, optimisation of power distribution and determination of electrical power price components, as well as the modelling of and tracking methods for power distribution in the electrical power system.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 93–97. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Procesy kształtowania się przepływów cyrkulacyjnych w sieciach przesyłowych systemu elektroenergetycznego

Autor

Stanisław Ziemiąnek

Słowa kluczowe

przepływy kołowe, przesuwniki fazowe, estymacja stanu, sieć przesyłowa, system elektroenergetyczny

Streszczenie

W artykule opisano mechanizm sekwencyjnego kształtowania się przepływów cyrkulacyjnych w sieciach przesyłowych systemu elektroenergetycznego. Do detekcji tych przepływów wykorzystuje się metodę automatycznej identyfikacji *circular flows* w oczkowej sieci przesyłowej – metodę opartą na wykorzystaniu teorii śledzenia przepływów mocy.

Przegląda się budowane w trakcie śledzenia przepływów mocy macierze wiążące przepływy mocy czynnej przez poszczególne węzły z mocami generowanymi (lub mocami odbieranymi) w poszczególnych węzłach. Metoda jest bardzo efektywna. Zastosowano ją do analiz pozornie skokowego pojawiania się *circular flows* w oczkowej sieci przesyłowej. Obserwuje się pewne prawidłowości w pojawianiu się tych przepływów w sieciach przesyłowych. Omówiono je na przykładzie znanego systemu IEEE 118.

1. Wstęp

W oczkowej sieci przesyłowej mogą się pojawiać przepływy cyrkulacyjne mocy czynnej i/lub bierniej (ang. *circular flows*). Przepływy cyrkulacyjne mocy czynnej mogą powstawać w wyniku oddziaływania zespołów transformatorowych z przekładnią poprzeczną (oraz elementów technologii FACTS będących ich funkcjonalnym rozszerzeniem). Odpowiednio dobrane przekładnie poprzeczne służą właściwemu kształtowaniu proporcji mocy czynnej płynącej poszczególnymi gałęziami sieciowymi. Gdy zabraknie koordynacji przekładni takich przesuwników fazowych (lub interesy operatorów poszczególnych podsystemów / obszarów sieciowych są rozbieżne) może pojawiać się w oczkach sieciowych cyrkulująca moc czynna zajmująca przekroje sieciowe i zmniejszająca współczynniki typu ATC, TTC itp., tj. obniżająca przepustowość sieci przesyłowej oraz zwiększająca straty sieciowe.

Przepływy cyrkulacyjne można identyfikować techniką *by inspection*, a następnie odpowiednio korygować przekładnie poprzeczne przesuwników fazowych, dokonywać zmian w konfiguracji sieci, korygować profile generacji itp. Wykonano na ten temat sporo prac (obszerny przegląd np. w [1], [4], [5]). Opracowane metody i rozwiązania mają swoje pozytywne i negatywne strony oraz rodowód wywodzący się np. z teorii grafów lub algebry liniowej. Uważa się powszechnie, że jest to zadanie trudne.

Jedną z bardzo efektywnych metod do identyfikacji przepływów cyrkulacyjnych opracowano ([2], [5], [6], [7], [8]), wykorzystując procedury śledzenia przepływów mocy czynnych (z zastosowaniem zasady proporcjonalności). Metoda opiera się na tym, że w wyniku nakładania się współczynników udziału mocy generowanych w poszczególnych węzłach (lub mocy odbieranych), w przypadku zaistnienia *circular flow*, następuje powtarzanie się

części takiej mocy w przepływie węzła. Dysponując pomiarami (WAMS, estymacja wektora stanu), tworzy się odpowiednie macierze dystrybucji i postępuje wg procedur śledzenia przepływów mocy [8]. Szkielet postępowania przedstawiono poniżej.

2. Szkic metody

Sposób postępowania prowadzący do identyfikacji przepływów cyrkulacyjnych mocy czynnych przebiega następująco:

Należy utworzyć macierz typu A_p^{lc} lub A_p^{lr} (wg [8]). Przyjmijmy, że została wybrana macierz A_p^{lc} . Występuje ona w relacji

$$P_G = A_p^{lc} \cdot P^{\rightarrow}$$

gdzie:

P_G – wektor mocy węzłowych generowanych

P^{\rightarrow} – wektor przepływów centralnych mocy czynnej każdego węzła, np. połowa sumy modułów mocy węzłowych (mocy gałęziowe, generacja lokalna, lokalny pobór mocy).

Należy, korzystając z technik macierzy rzadkich, uzyskać odwrotność macierzy A_p^{lc} (a właściwie wystarczy uzyskać tylko diagonalę tej macierzy) – otrzymuje się

$$P^{\rightarrow} = A_p^{lc-1} \cdot P_G$$

Należy przejrzeć diagonalę macierzy A_p^{lc-1} i jeśli element a_{ii} na głównej przekątnej tej macierzy jest większy od 1: $a_{ii} > 1$, $i \in C$, to przez węzeł i płynie *circular flow* gdzie: C – zbiór węzłów z $a_{ii} > 1$, czyli zbiór wierzchołków, na który są rozparte krawędzie grafu zawierającego cykle.

Należy, co nie jest kłopotliwe, upewnić się, które z gałęzi pomiędzy tymi węzłami wiodą przepływ cyrkulacyjny. Gdyby w sieci wystąpiła gałąź wielotorowa, to należy

każdą z nich potraktować wstępnie jako jedną zastępczą, a następnie przejrzeć te przypadki w zwykły sposób. Jeśli w sieci wystąpiło kilka *circular flows*, to kierując się poziomem każdego z a_{ii} , można wstępnie zawęzić obszar sieci do tych fragmentów i pogrupować fragmenty wg poziomów a_{ii} . W każdym z tych fragmentów należy, co nie jest kłopotliwe, upewnić się, które z gałęzi pomiędzy węzłami fragmentu wiodą przepływ cyrkulacyjny.

Można też skorzystać z macierzy dystrybucji mocy źródeł w stosunku do gałęzi, czyli równania typu

$$P^{\rightarrow} = D_{\rightarrow G_p} \cdot P_G$$

gdzie:

P^{\rightarrow} – wektor mocy gałęziowych.

Jeśli moc $P_{i \rightarrow j}$ w gałęzi $i-j$ płynie od węzła i do węzła j , a źródło (rzeczywiste lub potencjalnie możliwe) w węzle j ma swój udział w tej mocy, to mamy do czynienia z *circular flow* obejmującym tę gałąź.

Wielkość każdego z a_{ii} będzie zależała od mocy *circular flow* i od stosunków mocy gałęziowych do przepływów węzłowych w gałęziach i węzłach objętych *circular flow*. Im moc *circular flow* będzie większa i im stosunki mocy gałęziowych do przepływów węzłowych w gałęziach i węzłach objętych *circular flow* będą większe, tym a_{ii} będą większe. Wiąże się z tym to, że a_{ii} będą większe, jeśli oczka sieciowe objęte *circular flows* będą ciaśniejsze.

W rzeczywistych przypadkach nadwyżka a_{ii} ponad 1 bywa rzędu kilku, kilkunastu setnych. Uwarunkowanie macierzy A_p^{lc} jest zazwyczaj (w przypadkach rzeczywistych sieci) bardzo dobre.

W przypadku nakładania się oddziaływania kilku przesuwników fazowych elementy a_{ii} na głównej przekątnej macierzy A_p^{lc-1} mają charakterystyczne poziomy, związane z poszczególnymi obszarami sieci objętymi

oddziaływaniem lokalnego przesuwnika fazowego.

Z ogólnego punktu widzenia, dla każdego z zaobserwowanych pojedynczych *circular flow* typowe a_{ij} może być inne. Widać ([5]) charakterystyczne sumowanie się udziałów nadwyżkowych w węzłach, w których stykają się pojedyncze *circular flow*.

Można zauważyć ([5]), że tylko w wierszach i kolumnach macierzy A_p^{k-1} , odpowiadających węzłom, przez które wiedzie *circular flow* – elementy a_{ij} poza główną przekątną mogą być większe od 1 (ponieważ gałęzie rzeczywistych sieci nie generują mocy czynnej – typowo $a_{ij} \leq 1$).

Kształtowanie się przepływów cyrkulacyjnych ma szczególne znaczenie w przepływach transgranicznych. Może być rozpatrywane także z punktu widzenia przenikania się profili generacji i profili zapotrzebowania, w trakcie procesów zachodzących na rynku energii elektrycznej.

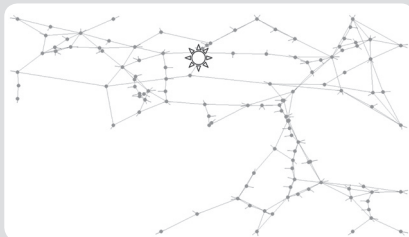
Osobne znaczenie mają pseudoprzepływy cyrkulacyjne, kiedy dla fragmentów sieci są stosowane ekwiwalenty sieciowe.

Jest to bardzo złożona tematyka, lecz głównym celem niniejszego artykułu jest przedstawienie procesów kształtowania się przepływów cyrkulacyjnych podczas forsowania przekładni poprzecznej wybranego przesuwnika fazowego i pozorne skokowe powiększanie się obszaru systemu obejmowanego *circular flows*. Zostanie to przedstawione w kolejnym rozdziale, z wykorzystaniem przykładu systemu testowego IEEE 118 ([3]).

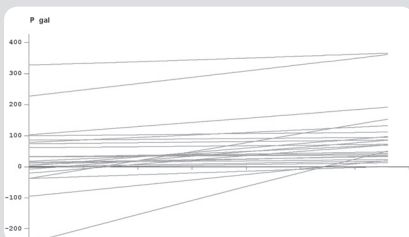
3. Procesy kształtowania się przepływów cyrkulacyjnych na przykładzie systemu IEEE 118

Schemat sieci testowej IEEE 118 [3] i miejsce usytuowania transformatora PST T51_(B38-B37) z przekładnią poprzeczną przedstawiono na rys. 1.

Przy ustawieniu neutralnym w sieci nie ma przepływów cyrkulacyjnych.



Rys. 1. Schemat sieci testowej IEEE 118 i miejsce usytuowania transformatora PST T51_(B38-B37) z przekładnią poprzeczną



Rys. 2. Zmienność (szkic) mocy czynnych gałęzi usytuowanych w obszarze, w którym mogą się kształtować przepływy cyrkulacyjne – w funkcji przekładni poprzecznej transformatora PST T51_(B38-B37)

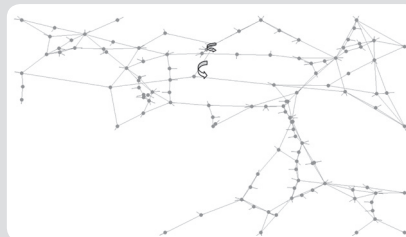
Charakterystyczna jest prawie liniowa zależność mocy czynnych gałęziowych przy zmianach przekładni poprzecznej transformatora PST w zakresie od 0 do 30 stopni.

Zmieniając przekładnię poprzeczną PST od 0 do 10 stopni obserwujemy, że zwroty mocy gałęziowych w zaznaczonych na rys. 3 czterech liniach: L45_(B19-B34), L54_(B38-B30), L48_(B33-B37), L18_(B13-B15) stają się (jedne po drugich) przeciwne (zmiana mocy gałęziowej może mieć nachylenie kilku MW na stopień przekładni PST – w przykładzie zaobserwowano maksymalnie 10 MW na stopień, w sensie miary łukowej).



Rys. 3. Zmieniające się na przeciwne zwroty mocy gałęziowych przy zmianach przekładni poprzecznej PST od 0 do 10 stopni w czterech zaznaczonych liniach L45_(B19-B34), L54_(B38-B30), L48_(B33-B37), L18_(B13-B15)

Kiedy dalej zwiększamy przekładnię poprzeczną PST – przy ok. 28 stopniach przechodzi przez zero i ulega odwróceniu moc P w PST (wrażliwość tej mocy wynosi ok. 3,5 MW na stopień), a równocześnie moc P w newralgicznej linii L50_(B34-B37), połączonej z górnym węzłem PST (wrażliwość tej mocy jest dużo większa – ok. 10 MW na stopień), jak na rys. 4.



Rys. 4. Zmieniające się na przeciwne zwroty mocy gałęziowych przy przekładni poprzecznej PST osiągającej ok. 28 stopni w transformatorze T51_(B38-B37) oraz zaznaczonej newralgicznej linii L50_(B34-B37)

W procesie kształtowania się przepływu cyrkulacyjnego te dwie gałęzie wystarczają, aby utworzony został graf cykliczny – w tym przypadku kilka oczek cyrkulacji mocy P, jak na rys. 5 (gałęzie oznaczone czerwonym kolorem, gałąź z PST pogrubiona).



Rys. 5. Usytuowanie grafu cyklicznego w procesie kształtowania się przepływu cyrkulacyjnego – w tym przypadku kilka oczek cyrkulacji mocy P (gałęzie oznaczone czerwonym kolorem, gałąź z PST pogrubiona)

Kiedy zwiększymy przekładnię poprzeczną PST o kolejnych 5 stopni – przechodzi przez zero i ulega odwróceniu moc P w linii L37_(B30-B8), jak na rys. 6 (wrażliwość mocy tej linii na zmianę przekładni PST jest niska – tylko ok. 1 MW na stopień).



Rys. 6. Usytuowanie kolejnej gałęzi linii L37_(B30-B8), w której przy zwiększaniu przekładni poprzecznej PST o kolejnych 5 stopni – ulega odwróceniu zwrot mocy P

Zmiana zwrotu mocy w tej gałęzi wystarcza, aby w istotny sposób poszerzony został obszar objęty grafami cyklicznymi – w tym przypadku kolejnych kilka oczek cyrkulacji mocy P, jak na rys. 7.



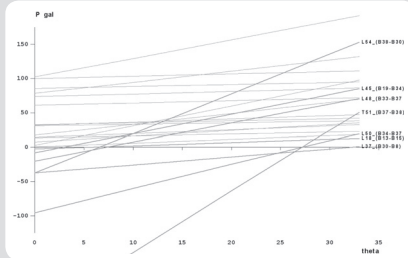
Rys. 7. Rozszerzenie zasięgu grafu cyklicznego na kolejny obszar (kolejne gałęzie) w procesie kształtowania się przepływu cyrkulacyjnego (przekładnia poprzeczna PST osiągnęła ok. 33 st.)

Przepływy cyrkulacyjne przy przekładni poprzecznej PST równej ok. 33 st. obejmują już znaczną część sieci – 24 gałęzie.

Poziomy mocy gałęziowych monitorowanych gałęzi przy zerowym (neutralnym) nastawieniu PST były rzędu ± 300 MW. Przy skrajnym nastawieniu PST mieszczą się w przedziale od 0 do 350 MW.

Moc PST zmieniła się tylko o ok. 120 MW. Na rys. 8 przedstawiono (w powiększeniu w stosunku do rys. 2) wykresy mocy wspomnianych 24 gałęzi objętych przepływami cyrkulacyjnymi. Naniesiono oznaczenia

gałęzi, w których następują zmiany zwrotu mocy gałęziowej. Można podkreślić rolę dwóch punktów przełomowych, kiedy moce gałęziowe transformatora T51_(B38-B37) oraz linii L50_(B34-B37) zmieniają zwrot oraz kiedy zmienia zwrot moc gałęziowa linii L37_(B30-B8).



Rys. 8. Wykresy mocy gałęzi objętych przepływami cyrkulacyjnymi (z naniesionymi oznaczeniami gałęzi, w których następują zmiany zwrotu mocy gałęziowej)

Charakterystyczne jest dodawanie do obszaru objętego przepływami cyrkulacyjnymi coraz to nowych gałęzi. W naturalny sposób takie gałęzie z coraz mniejszą wrażliwością na zmiany przekładni PST sytuują się często na skraju takiego obszaru. W procesie rozszerzania zakresu obszaru objętego przepływami cyrkulacyjnymi straty mocy w całej sieci wzrosły o 30% przy osiągnięciu nastawienia PST 28 st., a przy nastawieniu 34 st. wzrosły o 39% (w stosunku do stanu bazowego z zerową przekładnią PST). Takie zwiększone straty mocy można traktować jako cenę, za którą otrzymuje się bardziej pożądane proporcje mocy gałęziowych (lub likwidację przekroczeń przepustowości niewralgicznych gałęzi lub przekrojów sieciowych).

Jednak kolejnym, większym zagrożeniem jest dławienie tej przepustowości przez cyrkulującą moc, przepływ zajmujący przekroje tych niewralgicznych gałęzi. Monitorowanie i eliminowanie takich przypadków jest ważnym zadaniem stojącym przed operatorami i automatyką elektroenergetyczną. Z uwagi na brak winy operatorów źródeł wytwórczych i odbiorów kompleksowych we wzbudzeniu *circular flows* – zadanie eliminacji przepływów cyrkulacyjnych spoczywa na operatorze sieci przesyłowej.

4. Uogólnienia i rozszerzenia

Z uwagi na ograniczoną formułę prezentacji tematu nie przedstawiono przypadków dalszego poszerzania obszaru objętego *circular flows* w powyższym przykładzie. Przyjmując, że kolejne transformatory w sieci testowej IEEE 118 są przesuwnikami fazowymi – można uzyskać nakładanie się

obszarów objętych przepływami cyrkulacyjnymi, aż prawie cała sieć będzie nimi objęta (jest to oczywiście przypadek czysto teoretyczny). Detekcja *circular flows* przebiega tak, jak dla wariantu z pojedynczym PST. Jeśli jednak rozpatrzyć zagadnienie na szerszej płaszczyźnie rzeczywistego SEE, to odpowiednio silne PST ulokowane w pobliżu granic systemu mogą wywołać znaczący tranzyt, który może obejmować nawet wszystkie gałęzie interkonekcji (autor badań to zagadnienie, stosując podejście oparte na analizie wrażliwości). Nie musi to wywoływać *circular flows* (mogą to być zwykłe przepływy równoległe). Jeśli jednak rozważyć, że z punktu widzenia obserwatora, który notuje jedynie przepływy mocy w ujęciu międzysystemowym (a wnętrza poszczególnych systemów są sztucznymi ekwiwalentami) – moce te tworzą cykl, to negatywy takich pseudo *circular flows* będą podobne (ograniczenie przepustowości połączeń międzysystemowych). Z tego tytułu można pojęcie przepływów cyrkulacyjnych rozszerzyć na pseudocyrkulacyjne (na podobieństwo międzybankowych przepływów pieniężnych podejmowanych w złej wierze). Przedstawiona metoda (z pewnymi rozszerzeniami) jest odpowiednia do diagnostyki także takich przypadków.

5. Podsumowanie

Wykorzystując naturalne właściwości metody śledzenia przepływów mocy – z zastosowaniem zasady proporcjonalności – można w zautomatyzowany i niekłopotliwy sposób identyfikować ew. *circular flows* powstające w oczkach sieci.

Korzysta się z budowanych w trakcie śledzenia przepływów mocy macierzy wiążących przepływy mocy czynnej przez poszczególne węzły z mocami generowanymi w poszczególnych węzłach lub z mocami odbieranymi. Macierze te są rzadkie i prawie trójkątne – mają strukturę opartą na podzbiorze elementów macierzy admitancyjnej węzłowej. Po niekłopotliwym odwróceniu tych macierzy otrzymuje się zazwyczaj także rzadkie i prawie trójkątne macierze odwrotne. Jest to bardzo mało czasochłonny proces, a wystarczy uzyskać tylko diagonalę jednej z tych macierzy i ją przejrzeć.

W artykule (na przykładzie systemu testowego IEEE 118) przedstawiono kolejne etapy kształtowania się przepływów cyrkulacyjnych podczas zmian przekładni poprzecznej jednego z transformatorów. Można zaobserwować pozornie skokowe powiększanie się obszaru systemu objętego przepływami cyrkulacyjnymi. W wyniku odwrócenia mocy gałęziowej w kolejnej niewralgicznej gałęzi następuje,

obejmujące często grupę kilku gałęzi, poszerzanie obszaru objętego przepływami cyrkulacyjnymi. W każdej z tych gałęzi cyrkulująca moc zmniejsza dostępną zdolność przesyłową. Cyrkulacje mocy można eliminować, kierując się rozstrzygnięciami formowanymi na gruncie porównań ekonomicznych (dostępne zdolności przesyłowe, respektowanie lub zmniejszanie kosztów powiększających się strat sieciowych, poziomy cen marginalnych energii elektrycznej). Na tym gruncie może nastąpić rozstrzygnięcie: eliminować, już eliminować czy nie eliminować?

W artykule przedstawiono także typowe poziomy wrażliwości mocy gałęziowych na zmiany przekładni poprzecznych PST. Przedstawiono wykresy mocy gałęziowych w funkcji zmian tych przekładni. Charakterystyczna jest prawie liniowa zależność tych mocy od przekładni (bazowy stan pracy systemu testowego IEEE 118 nie należał do zbyt perforsowanych).

Bibliografia

1. Achayuthakan C. i.in., Electricity Tracing in Systems With and Without Circulating Flows: Physical Insights and Mathematical Proofs, *IEEE Trans. Power Systems*, May 2010, Vol. 25, Issue 2, s. 1078–1087.
2. Bialek J.W., Tracing the flow of electricity, *IEEE Proc. Gen. Transm. Distrib.*, July 1996, Vol. 143, s. 313–320.
3. IEEE 118 test system [on-line], www.ee.washington.edu/University.
4. Wei P., Ni Y., Wu F.F., Load flow tracing in power systems with circulating power, *Electrical Power and Energy Systems, Elsevier*, 2002, No. 24, s. 807–813.
5. Ziemiąnek S., Bialek J.W., Identification of Circular Flows in Transmission Networks using the Electricity Tracing Methodology, *Power System Computation Conference – PSCC 2008*, Glasgow UK.
6. Ziemiąnek S., Wybrane zastosowania metody śledzenia przepływów mocy czynnej i biernej w analizach stanów pracy ustalonej systemu elektroenergetycznego, t. 1, *Konferencja APE 2007*, Jurata, s. 22–31.
7. Ziemiąnek S., Przepływy cyrkulujące mocy czynnej i biernej w nowoczesnej, oczkowej sieci przesyłowej – identyfikacja, wpływ, granice tolerancji, praca w ramach Dz. Stat., IE PW, Warszawa 2009.
8. Ziemiąnek S., Metody śledzenia przepływów w sieciach elektroenergetycznych w zastosowaniu do analiz techniczno-ekonomicznych, OWPW, 2008.

Stanisław Ziemiąnek

dr hab. inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: stanislaw.ziemiąnek@ien.pw.edu.pl

Całe życie zawodowe poświęcił pracy w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują m.in.: zagadnienia tworzenia modeli matematycznych oraz wyznaczania i analiz stanów pracy sieci i systemów elektroenergetycznych, optymalizację przepływów mocy i szczegółów kształtowania składników cen energii elektrycznej, tworzenie modeli i metod śledzenia przepływów mocy w systemie elektroenergetycznym.