

TJES

ISSN: 1813-162X

مجلة تكريت للعلوم الهندسية

متاحة على الموقع الإلكتروني: <http://www.tj-es.com>

تأثير إضافة متسعات التوالي ومحولات إزاحة الطور على أداء منظومة القدرة

بروين رحيم كريم الداودي²محمد علي عبد الله الراوي¹¹ قسم الهندسة الكهربائية، جامعة الموصل، الموصل، العراقismaelmosa83@yahoo.com² المعهد التقني، الحويجة، كركوك، العراقparween@alhawejist.org

الخلاصة

يُعد تعزيز أداء منظومة القدرة من المسائل الضرورية لديمومة الخدمة للمستهلكين مع نمو الأحمال الحثية و الزيادة السكانية. ويهدف البحث الحالي إلى تحسين وتعزيز أداء المنظومة عن طريق استخدام متسعات التوالي ومحولات إزاحة الطور عند إدخال هاتين الأداةين كلاً على حدا بصورة منفردة في المنظومة، ومن ثم إضافتهما سوياً في ان واحد وفي خطين منفصلين لحالتي حمل، وهما حمل الأساس للمنظومة والزيادة في حمل الأساس بمقدار 25%. تمت دراسة انسيابية القدرة في المنظومة برمجياً باستخدام برنامج (Matlab) الإصدار 7.6. أظهرت الدراسة كفاءة كلاً من متسعات التوالي ومحولات إزاحة الطور في تحسين تحميلية الخط سواءً أضيفتا بصورة منفردة في المنظومة أو عند إضافتهما سوياً في أن واحد، وقد كانت أكبر نسبة لتحسين تحميلية الخط عند وجود متسعة التوالي هي 53.15% في الخط 1-5 أي 0.4084 p.u، أما بالنسبة للمحولة فكانت 53.25% أي 0.2716 p.u عند وجود المحولة في الخط 5-11. وكما أظهرت الدراسة أن إضافة متسعة التوالي ومحولة الإزاحة الطورية في أن واحد في المنظومة ستكون أكثر كفاءة في تعزيز وتحسين أداء المنظومة من إضافتهما بصورة منفردة. طبقت الدراسة الحالية على المنظومة الاختبارية IEEE ذات 14 عمودياً و 20 خط نقل.

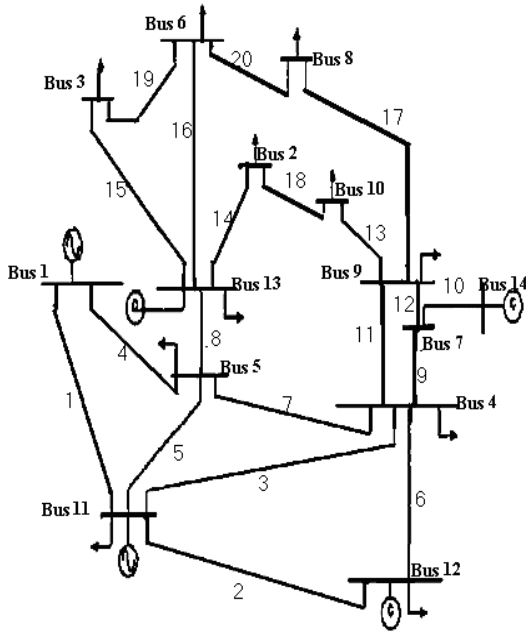
الكلمات الدالة: متسعات التوالي، محولات إزاحة الطور، منظومة القدرة.

The Effect of Adding Series Capacitor and Phase Shifting Transformer on Power System Performance

Abstract

Promoting power system performance is regarded as one of the essential issues for a sustainable customer service, alongside with the expansion of the inductive loads and population increase. The study aims to improve and promot power system performance by using series capacitors and phase – shifting transformers. The capacitors and transformers are used separately in the system, then they are used together in two separate lines for two load cases: the base load and the increasing the base load 25%. The system power flow has been examined by utilizing Matlab version 7.6. The study shows that the efficiency of both series capacitors and phase – shifting transformers in improving line loadability, whether used together or separately. The highest rate for improving line loadability was 53.15% when using series capacitor in the line 1 – 5. As for the transformer, the highest rate was 53.25% in the line 11–5. The study has also shown that adding series capacitor and phase–shifting transformer simultaneously to the system is more efficient in promoting and improving system performance than adding them separately. The current study has been applied on the test system IEEE with 14 buses and 20 transmission lines.

Key words: Series Capacitor, Phase Shifting Transformer, Power System.



الشكل (2) منظومة IEEE ذات 14 عموماً

تم حساب انسيابية القدرة في المنظومة باستخدام برنامج ماتلاب (الإصدار 7.6) يستخدم طريقة نيوتن-رافسون التكرارية، واستخدمت دقة في البرنامج مقداره 10^{-5} ، يوضح الجدول (1) نتائج انسيابية القدرة في المنظومة في الحالة الطبيعية (عند عدم إضافة الأداة) ويتبين من الجدول (1) بأن الخط (11-1) محمل بأكثر من الطاقة الاستيعابية في حين تكون بقية الخطوط ضمن الحدود المسموح بها. ويوضح الشكل (3) المخطط الانسيابي للبرنامج المستخدم.

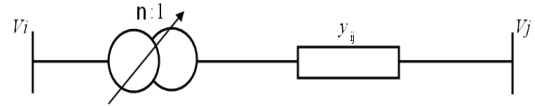
الجدول (1) نتائج انسيابية القدرة عند عدم إضافة محولة إزاحة الطور و متسع التعيوض

الخطوط	سريان القدرة في الخطوط	
	الحمل الأساس	الحمل 125%
1-11	1.5733 + 0.5529i	2.0909 + 0.4349i
11-12	0.7441 - 0.1611i	0.9403 - 0.1728i
11-4	0.5520 - 0.0943i	0.6897 - 0.0759i
1-5	0.7684 + 0.1161i	0.9904 + 0.1403i
11-5	0.4110 - 0.1318i	0.5101 - 0.1096i
12-4	-0.2245 + 0.1234i	-0.2796 + 0.1995i
4-5	-0.6112 + 0.0167i	-0.7674 + 0.0643i
5-13	0.4472 + 0.0119i	0.5657 - 0.0042i
4-7	0.2788 + 0.0534i	0.3467 + 0.0576i
7-14	0.0000 - 0.1128i	0.0000 - 0.1583i
4-9	0.1586 + 0.0531i	0.1965 + 0.0646i
7-9	0.2788 + 0.1490i	0.3467 + 0.1891i
9-10	0.0510 - 0.0004i	0.0617 - 0.0058i
13-2	0.0757 + 0.0801i	0.0975 + 0.1072i
13-3	0.0796 + 0.0310i	0.1006 + 0.0402i
13-6	0.1799 + 0.0958i	0.2276 + 0.1251i
9-8	0.0914 + 0.0091i	0.1127 + 0.0090i
10-2	-0.0391 - 0.0586i	-0.0510 - 0.0786i
3-6	0.0177 + 0.0131i	0.0229 + 0.0172i
6-8	0.0598 + 0.0454i	0.0771 + 0.0609i

تمثيل و نمذجة محولة إزاحة الطور [9]

تمثلت محولة إزاحة الطور بنموذج المسابرة (Admittance model) وهي محولة مثالية ذات نسبة تحويل مركبة مقدارها (n:1) ومسابرة مربوطة

معها على التوالي مقدارها Y_{ij} ويوضح الشكل (1) الدائرة المكافئة لنموذج المسابرة لمحولة إزاحة الطور.



الشكل (1) الدائرة المكافئة لنموذج المسابرة لمحولة إزاحة الطور

فإذا ربطت المحولة بين العمومي i والعمومي j ضمن خط نقل القدرة الرابط بينهما؛ فإن عناصر المسابرة للعموميين i و j ستتأثر وتتغير في مصفوفة المسابرة (Y_{bus}). فتصبح العناصر غير القطرية فيها بعد إضافة محولة إزاحة الطور غير متماثلة.

$$Y_{ij} \neq Y_{ji} \dots \dots \dots (4)$$

تصبح عناصر مصفوفة المسابرة الخاصة بمحولة إزاحة الطور بعد إضافة المحولة كما في المعادلات الآتية:

$$Y_{ijnew} = \frac{Y_{ijold}}{a_s - jb_s} \dots \dots \dots (5)$$

$$Y_{jinew} = \frac{Y_{jiold}}{a_s + jb_s} \dots \dots \dots (6)$$

$$Y_{iinew} = Y_{iold} \dots \dots \dots (7)$$

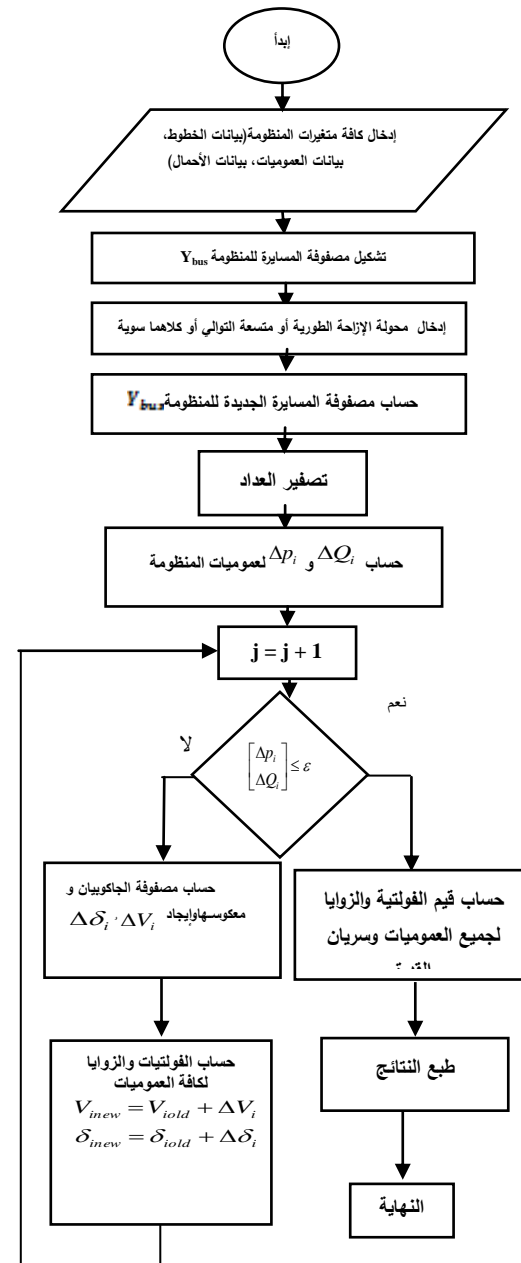
$$Y_{jjnew} = \frac{Y_{jjold}}{a_s^2 + b_s^2} \dots \dots \dots (8)$$

النتائج والمناقشة

طبقت الدراسة على منظومة IEEE ذات 14 عمومي وهذه المنظومة هي منظومة نموذجية من منظومات IEEE، وتتكون هذه المنظومة من 14 عموماً تتوزع على الأنواع الثلاثة، أحدها العمومي العائم (Slack Bus) وهو العمومي رقم (1)، وأربع عموميات توليد (Generation Bus) هي العموميات المرقمة (11 و12 و13 و14)، أما العموميات العشرة المتبقية فهي عموميات حمل (Load Bus)، وتتضمن المنظومة أيضاً 20 خطاً لنقل القدرة تربط بين عموميات المنظومة. يوضح الشكل (2) مخططاً لمنظومة IEEE ذات 14 عمومي مبيناً فيها جميع العموميات والخطوط الرابطة بينها، تم اختيار قيمة الأساس للقدرة 100 (MVA).

الجدول (2) نتائج انسيابية القدرة عند وجود المتسعة في الخط 4-11

الخطوط	سريان القدرة في الخطوط	
	الحمل الاساس	
	$K_S=20\%$	$K_S=60\%$
1-11	1.5945 +0.5477i	1.6566 +0.5328i
11-12	0.7265 -0.1597i	0.6849 - 0.1560i
11-4	0.6176 - 0.1402i	0.7875 - 0.334i
1-5	0.7497 +0.1207i	0.7033 +0.1450i
11-5	0.3832 - 0.1213i	0.3138 - 0.079i
12-4	-0.2409+0.138i	-0.2798+0.201i
4-5	-0.5700 -0.012i	-0.4660 -0.120i
5-13	0.4451 +0.0091i	0.4406 - 0.008i
4-7	0.2802 +0.0498i	0.2834 +0.0297i
7-14	0.0000 - 0.1157i	0.0000 - 0.133i
4-9	0.1594 +0.0516i	0.1610 +0.0434i
7-9	0.2802 +0.1482i	0.2834 +0.1451i
9-10	0.0523 - 0.0019i	0.0555 - 0.008i
13-2	0.0744 +0.0816i	0.0714 +0.0890i
13-3	0.0795 +0.0312i	0.0793 +0.0322i
13-6	0.1792 +0.0966i	0.1779 +0.1003i
9-8	0.0922 +0.0082i	0.0939 +0.0036i
10-2	-0.0377 -0.060i	-0.0347 -0.067i
3-6	0.0176 +0.0133i	0.0174 +0.0143i
6-8	0.0590 +0.0464i	0.0574 +0.0511i
الخطوط	سريان القدرة في الخطوط عند 125% من الحمل	
	$K_S=20\%$	$K_S=60\%$
1-11	2.1184 + 0.4291i	2.2021 +0.4117i
11-12	0.9175 - 0.1718i	0.8632 - 0.1691i
11-4	0.7737 - 0.1279i	0.9957 - 0.3560i
1-5	0.9666 + 0.1436i	0.9071 + 0.167i
11-5	0.4744 - 0.0986i	0.3844 - 0.0510i
12-4	-0.3003+0.2169i	i1-0.3500 + 0.29
4-5	-0.7160+0.0289i	-0.5840 - 0.1009
5-13	0.5629 - 0.0065i	0.5573 - 0.0248i
4-7	0.3485 + 0.0542i	0.3525 + 0.0325
7-14	0.0000 - 0.1611i	0.0000 - 0.1800i
4-9	0.1975 + 0.0632i	0.1995 + 0.0543
7-9	0.3485 + 0.1882i	0.3525 + 0.1848
9-10	0.0634 - 0.0073i	0.0674 - 0.0152i
13-2	0.0958 + 0.1088i	0.0920 + 0.1172
13-3	0.1004 + 0.0405i	0.1002 + 0.0416
13-6	0.2268 + 0.1259i	0.2251 + 0.1302
9-8	0.1138 + 0.0080i	0.1159 + 0.0030
10-2	-0.0492 -0.0802i	-0.0453 -0.0881
3-6	0.0227 + 0.0175i	0.0225 + 0.0186
6-8	0.0761 + 0.0620i	0.0741+0.0673i



الشكل (3) المخطط الانسيابي لبرنامج سريان القدرة بطريقة نيوتن-رافسون التكرارية

يتبين من ملاحظة النتائج المعروضة في الجدول (2) إنه عند ربط المتسعة في الخط 4-11 ونتيجة لتقليل المفاعلة الكلية للخط فإن القدرة الفاعلة المنقولة فيها تزداد، إذ كانت القدرة الفاعلة في هذا الخط عند الحمل الاساس مثلاً قبل ربط المتسعة مساوية إلى (0.552p.u) بينما تصبح بعد تعويض الخط مساوية إلى (0.6176p.u) و (0.7875p.u) عند درجتي التعويض 20% و 60%، أي أن المتسعة حسنت من تحميلية الخط 4-11 بنسبة 12% و 42.66% على التوالي. تقل قيم الفولتية والزوايا لكافة عموميات المنظومة، إذ يحصل هبوط طفيف في فولتية العموميات فمثلاً عند الحمل الاساس للمنظومة يحصل أكبر انخفاض في فولتية العمومي 7 و يبلغ 0.87% عند درجة التعويض 60% وهي ضمن المعايير المسموح بها (±5%)، أما بالنسبة لزوايا الفولتية

إضافة متسعات التوالي ومحولات إزاحة الطور بصورة منفردة في المنظومة

إضافة متسعة التوالي بصورة منفردة

إضافة المتسعة في الخط 4-11

يبين الجدول (2) نتائج انسيابية القدرة عند حشر المتسعة في الخط 4-11 عند الحمل الاساسي والحمل 125% من الحمل الاساسي.

الجدول (4) نتائج انسيابية القدرة عند وجود المتسعة في الخط 5-1

الخطوط	سريان القدرة في الخطوط	
	الحمل الأساس	
	$K_S=20\%$	$K_S=60\%$
1-11	1.4689 +0.5788i	1.1722 +0.6562i
11-12	0.7266 - 0.1597i	0.6772 - 0.1553i
11-4	0.5170 - 0.0914i	0.4167 - 0.0720i
1-5	0.8717 +0.1073i	1.1768 +0.0147i
11-5	0.3641 - 0.1273i	0.2287 - 0.0960i
12-4	-0.2409+0.1256i	-0.2869+0.1423i
4-5	-0.6584+0.0237i	-0.7935+0.0685i
5-13	0.4496 +0.0171i	0.4573 +0.0213i
4-7	0.2772 +0.0558i	0.2724 +0.0581i
7-14	0.0000 - 0.1109i	0.0000 - 0.1098i
4-9	0.1578 +0.0541i	0.1550 +0.0552i
7-9	0.2772 +0.1497i	0.2724 +0.1513i
9-10	0.0495 +0.0008i	0.0448 +0.0029i
13-2	0.0772 +0.0789i	0.0819 +0.0769i
13-3	0.0798 +0.0308i	0.0803 +0.0305i
13-6	0.1806 +0.0952i	0.1830 +0.0942i
9-8	0.0905 +0.0099i	0.0876 +0.0112i
10-2	-0.0406 -0.0574i	-0.0452 -0.0553i
3-6	0.0179 +0.0129i	0.0184 +0.0126i
6-8	0.0606 +0.0446i	0.0635 +0.0432i
الخطوط	الحمل 125%	
	$K_S=20\%$	
	$K_S=20\%$	$K_S=60\%$
1-11	1.9560 + 0.4640i	1.5798 + 0.5513i
11-12	0.9180 - 0.1719i	0.8568 - 0.1688i
11-4	0.6455 - 0.0718i	0.5206 - 0.0444i
1-5	1.1230 + 0.1208i	1.5129 - 0.0315i
11-5	0.4506 - 0.1023i	0.2817 - 0.0554i
12-4	-0.2999 +0.2041i	-0.3560 +0.2319i
4-5	-0.8263 +0.0780i	-0.9922 +0.1508i
5-13	0.5688 + 0.0007i	0.5788 - 0.0004i
4-7	0.3447 + 0.0599i	0.3384 + 0.0596i
7-14	0.0000 - 0.1566i	0.0000 - 0.1576i
4-9	0.1954 + 0.0655i	0.1918 + 0.0656i
7-9	0.3447 + 0.1899i	0.3384 + 0.1916i
9-10	0.0598 - 0.0045i	0.0537 - 0.0026i
13-2	0.0994 + 0.1059i	0.1056 + 0.1042i
13-3	0.1008 + 0.0400i	0.1015 + 0.0397i
13-6	0.2286 + 0.1245i	0.2317 + 0.1238i
9-8	0.1116 + 0.0098i	0.1077 + 0.0110i
10-2	-0.0529 - 0.0773i	-0.0589 - 0.0754i
3-6	0.0231 + 0.0170i	0.0238 + 0.0167i
6-8	0.0782 + 0.0600i	0.0820 + 0.0588i

أما بالنسبة لفولتية العموميات وزواياها فإنه يحصل تحسين فيها بعد إضافة المتسعة وأكبر تحسين يكون في فولتية العمومي (5) لوجود المتسعة بينه وبين العمومي العائم ويكون بنسبة (0.21%) عندما الـ ($K_S=60\%$) عند الحمل الأساس للمنظومة، كما تقل زوايا الفولتية لكافة العموميات ومن الممكن ملاحظة ذلك من الجدول (5).

فإنها تقل في أغلب عموميات المنظومة لكن بدرجة قليلة لا يتجاوز أكبر قيمة لها 1.28° في العمومي رقم 4، يوضح الجدول (3) النتائج الخاصة بقيم الفولتيات والزوايا.

الجدول (3) فولتيات وزوايا العموميات للحملين (الأساس والحمل 125%) عند وجود المتسعة في الخط 4-11

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة			
	عند عدم وجود المتسعة		$K_S=60\%$	
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9769	-15.7678	0.9755	-14.761
3	0.9824	-16.2966	0.9821	-15.376
4	0.9892	-10.3525	0.9805	-9.0626
5	0.9966	-8.8332	0.9916	-7.9907
6	0.9758	-16.3350	0.9753	-15.395
7	0.9797	-13.8028	0.9760	-12.615
8	0.9492	-17.1420	0.9471	-16.093
9	0.9635	-15.6655	0.9602	-14.522
10	0.9619	-15.9327	0.9591	-14.831
11	1.0000	-4.3971	1.0000	-4.6857
12	1.0000	-13.1926	1.0000	-12.787
13	1.0000	-15.3304	1.0000	-14.423
14	1.0000	-13.8028	1.0000	-12.615
الخطوط	الحمل 125%			
	عند عدم وجود المتسعة		$K_S=60\%$	
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9695	-20.427	0.9693	-20.06
3	0.9776	-21.101	0.9775	-20.76
4	0.9807	-13.557	0.9795	-13.10
5	0.9885	-11.586	0.9880	-11.28
6	0.9689	-21.147	0.9688	-20.80
7	0.9713	-17.924	0.9708	-17.50
8	0.9336	-22.187	0.9333	-21.80
9	0.9507	-20.295	0.9503	-19.88
10	0.9491	-20.635	0.9488	-20.24
11	1.0000	-6.1847	1.0000	-6.279
12	1.0000	-17.272	1.0000	-17.10
13	1.0000	-19.882	1.0000	-19.54
14	1.0000	-17.924	1.0000	-17.50

إضافة متسعة التوالي في الخط 5-1

يبين الجدول (4) نتائج انسيابية القدرة عند الحمل الأساس للمنظومة وعند الزيادة في الحمل بمقدار 25% ولدرجتي تعويض هما 20% و 60% لهذه الحالة الدراسية.

يتبين عند ملاحظة الجدول أنه عند الحمل الأساس للمنظومة مثلاً أن موقع المتسعة في الخط 5-1 له دور كبير في التقليل من تحميلية الخط 11-1 الذي يعاني من التحميل الزائد مقارنةً ببقية خطوط المنظومة. وتقل القدرة المنقولة على هذا الخط بزيادة (K_S) للمتسعة إذ أن نسبة النقصان في القدرة الفاعلة على هذا الخط كانت 6.64 و 25.5% عند درجتي التعويض 20% و 60% على التوالي، بينما يلاحظ تحسين تحميلية الخط (5-1) نتيجة وجود المتسعة وتكون نسبة التحسين في تحميلية هذا الخط بمقدار 53.15% عند ($K_S=60\%$)، فضلاً عن ذلك أدى وجود المتسعة في هذا الخط في تحسين تحميلية الخطوط (4-12) و (5-4) و (13-5) و (2-13) و (3-13) و (6-13) و (2-10) و (6-3) و (8-6).

الحثية في الخطوط المرتبطة مع العمومي (5). وتتأثر قيم الفولتية للعموميات بنسب طفيفة سواء كانت زيادة أو نقصاناً إذ لا تتجاوز نسبة الزيادة مقدار (0.032%) أما النسبة المنوية للنقصان لم تتجاوز (0.05%) وهذه النسب تكون ضمن المعايير المسموح بها ($\pm 5\%$). أما بالنسبة لزوايا الفولتية فإنها تزداد بضع درجات مقارنة بالزوايا عند عدم وجود المحولة ومن الممكن ملاحظة ذلك في الجدول (9).

الجدول (6) نتائج انسيابية القدرة عند وجود المحولة في الخط 4-11

الخطوط	سريان القدرة في الخطوط	
	الحمل الأساس	
	الزاوية 6	الزاوية 9
1-11	1.4754 + 0.5771i	1.4353 + 0.5873i
11-12	0.8449 - 0.1681i	0.8946 - 0.1708i
11-4	0.7269 - 0.1184i	0.8232 - 0.1293i
1-5	0.8723 + 0.1139i	0.9244 + 0.1160i
11-5	0.5636 - 0.1602i	0.6378 - 0.1695i
12-4	-0.1314 + 0.0832i	-0.0858 + 0.0682i
4-5	-0.8326 + 0.1197i	-0.9396 + 0.1670i
5-13	0.4607 + 0.0089i	0.4674 + 0.0055i
4-7	0.2703 + 0.0535i	0.2662 + 0.0518i
7-14	0.0000 - 0.1141i	0.0000 - 0.1164i
4-9	0.1538 + 0.0535i	0.1514 + 0.0529i
7-9	0.2703 + 0.1514i	0.2662 + 0.1525i
9-10	0.0429 + 0.0021i	0.0388 + 0.0028i
13-2	0.0839 + 0.0778i	0.0880 + 0.0773i
13-3	0.0806 + 0.0305i	0.0811 + 0.0304i
13-6	0.1841 + 0.0947i	0.1862 + 0.0945i
9-8	0.0863 + 0.0107i	0.0837 + 0.0112i
10-2	-0.0472 - 0.0561i	-0.0512 - 0.0554i
3-6	0.0187 + 0.0126i	0.0192 + 0.0125i
6-8	0.0649 + 0.0437i	0.0674 + 0.0432i
الخطوط	الحمل 125%	
	الزاوية 6	الزاوية 9
	1-11	2.0359 + 0.4466i
11-12	0.9935 - 0.1746i	1.0926 - 0.1765i
11-4	1.9911 + 0.4563i	0.9562 - 0.1032i
1-5	1.0426 - 0.1758i	1.1464 + 0.1494i
11-5	0.8601 - 0.0945i	0.7380 - 0.1416i
12-4	1.0947 + 0.1442i	-0.1418 + 0.1415i
4-5	0.6640 - 0.1343i	-1.0897 + 0.2267i
5-13	-0.1868 + 0.1573i	0.5856 - 0.0111i
4-7	-0.9855 + 0.1757i	0.3342 + 0.0560i
7-14	0.5790 - 0.0075i	0.0000 - 0.1614i
4-9	0.3383 + 0.0577i	0.1894 + 0.0643i
7-9	0.0000 - 0.1593i	0.3342 + 0.1924i
9-10	0.1918 + 0.0649i	0.0497 - 0.0024i
13-2	0.3383 + 0.1914i	0.1097 + 0.1043i
13-3	0.0536 - 0.0032i	0.1021 + 0.0397i
13-6	0.1057 + 0.1048i	0.2338 + 0.1239i
9-8	0.1016 + 0.0398i	0.1052 + 0.0111i
10-2	-0.0551 - 0.0770i	-0.0629 - 0.0752i
3-6	0.0234 + 0.0170i	0.0243 + 0.0166i
6-8	0.0797 + 0.0598i	0.0846 + 0.0587i

الجدول (5) فولتيات وزوايا العموميات للحملين (الأساس والحمل 125%) عند وجود المتسعة في الخط 5-1

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة			
	عند عدم وجود المتسعة		K _S =60%	
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9769	-15.767	0.9770	-12.645
3	0.9824	-16.296	0.9825	-13.098
4	0.9892	-10.352	0.9908	-7.4876
5	0.9966	-8.8332	0.9987	-5.4887
6	0.9758	-16.335	0.9758	-13.153
7	0.9797	-13.802	0.9803	-10.851
8	0.9492	-17.142	0.9494	-14.064
9	0.9635	-15.665	0.9638	-12.670
10	0.9619	-15.932	0.9621	-12.898
11	1.0000	-4.3971	1.0000	-3.0025
12	1.0000	-13.192	1.0000	-11.014
13	1.0000	-15.330	1.0000	-12.118
14	1.0000	-13.802	1.0000	-10.851
الخطوط	الحمل 125%			
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
	1	1.0600	0	1.0600
2	0.9695	-20.427	0.9693	-16.47
3	0.9776	-21.101	0.9776	-17.05
4	0.9807	-13.557	0.9814	-9.927
5	0.9885	-11.585	0.9890	-7.330
6	0.9689	-21.147	0.9688	-17.11
7	0.9713	-17.924	0.9714	-14.18
8	0.9336	-22.187	0.9334	-18.29
9	0.9507	-20.292	0.9505	-16.49
10	0.9491	-20.635	0.9489	-16.79
11	1.0000	-6.1847	1.0000	-4.419
12	1.0000	-17.271	1.0000	-14.53
13	1.0000	-19.882	1.0000	-15.81
14	1.0000	-17.924	1.0000	-14.18

إضافة محولة إزاحة الطور بصورة منفردة

إضافة محولة إزاحة الطور في الخط 4-11

يوضح الجدول (6) نتائج انسيابية القدرة عند إضافة المحولة في الخط 4-11 عند الحملين الأساس والزيادة بمقدار 25% في الحمل ولزاويتين للمحولة هما 6 و 9 درجة. ويلاحظ من الجدول (الحمل الطبيعي) أن القدرة الفاعلة المنقولة في الخط (4-11) تزداد بزيادة زاوية الإزاحة الطورية (φ) للمحولة، ويؤدي هذا إلى تقليل التحميل في خطوط أخرى في المنظومة في الوقت نفسه. أما الجدول (7) فيبين قيم الفولتيات والزوايا لعموميات المنظومة عند الزاوية 9 درجة للمحولة ولحالتها حمل المنظومة (الحمل الأساس والحمل 125%) لها). ويلاحظ من الجدول حصول هبوط قليل لقيم الفولتيات وأعلى هبوط يكون 0.1% في العمومي التاسع عند الحمل 125%، بينما تزداد زوايا الفولتية للعموميات بضع درجات لا تتجاوز 2.86° في أعظم زيادة لها.

إضافة المحولة في الخط 5-11

يوضح الجدول (8) نتائج هذه الحالة الدراسية، لو تمعنا النظر في كيفية تأثير القدرة المتفاعلة في المنظومة فإننا سنلاحظ زيادة القدرة المتفاعلة السعوية في الخطوط المرتبطة مع العمومي 11 ونقصاناً في القدرة المتفاعلة

1-11	2.0185 +0.4504i	1.9562 + 0.4640i
11-12	0.9787 - 0.1742i	1.0152 - 0.1752i
11-4	0.7678 - 0.0900i	0.8412 - 0.0999i
1-5	1.0622 +0.1367i	1.1304 + 0.1370i
11-5	0.5905 - 0.1217i	0.6856 - 0.1376i
12-4	-0.2446+0.1836i	-0.2115 +0.1714i
4-5	-0.6654+0.0187i	-0.5700 - 0.0194i
5-13	0.5596 - 0.0037i	0.5541 - 0.0054i
4-7	0.3505 +0.0574i	0.3540 + 0.0561i
7-14	0.0000 - 0.1581i	0.0000 - 0.1588i
4-9	0.1987 +0.0644i	0.2007 + 0.0638i
7-9	0.3505 +0.1880i	0.3540 + 0.1869i
9-10	0.0654 - 0.0070i	0.0687 - 0.0085i
13-2	0.0938 +0.1083i	0.0904 + 0.1097i
13-3	0.1001 +0.0404i	0.0997 + 0.0407i
13-6	0.2257 +0.1257i	0.2240 + 0.1263i
9-8	0.1151 +0.0082i	0.1172 + 0.0073i
10-2	-0.0473 -0.0799i	-0.0439 - 0.0814i
3-6	0.0224 +0.0175i	0.0220 + 0.0177i
6-8	0.0748 +0.0618i	0.0727 + 0.0628i

الجدول (9) فولتيات وزوايا العموميات للحملين (الأساس والحمل 125%) عند الزاوية 6 للمحولة عند وجود المحولة في الخط 5-11

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة			
	عند عدم وجود المحولة		الزاوية 6° للمحولة	
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9769	-15.7678	0.9771	-17.237
3	0.9824	-16.2966	0.9824	-17.847
4	0.9892	-10.3525	0.9888	-11.541
5	0.9966	-8.8332	0.9967	-10.571
6	0.9758	-16.3350	0.9758	-17.869
7	0.9797	-13.8028	0.9797	-15.085
8	0.9492	-17.1420	0.9494	-18.562
9	0.9635	-15.6655	0.9637	-16.997
10	0.9619	-15.9327	0.9621	-17.306
11	1.0000	-4.3971	1.0000	-3.9370
12	1.0000	-13.1926	1.0000	-13.597
13	1.0000	-15.3304	1.0000	-16.897
14	1.0000	-13.8028	1.0000	-15.085
الخطوط	الحمل 125%			
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9695	-20.427	0.9696	-21.91
3	0.9776	-21.101	0.9776	-22.67
4	0.9807	-13.557	0.9802	-14.75
5	0.9885	-11.585	0.9886	-13.34
6	0.9689	-21.147	0.9690	-22.70
7	0.9713	-17.924	0.9712	-19.22
8	0.9336	-22.187	0.9337	-23.62
9	0.9507	-20.292	0.9509	-21.63
10	0.9491	-20.635	0.9494	-22.02
11	1.0000	-6.1847	1.0000	-5.720
12	1.0000	-17.271	1.0000	-17.68
13	1.0000	-19.882	1.0000	-21.46
14	1.0000	-17.924	1.0000	-19.22

إضافة متسعة التوالي ومحولة إزاحة الطور في المنظومة في آن واحد

ربطت متسعة التوالي في الخط 8-9 ومحولة الإزاحة الطورية في الخط 11-12 لبيان كيفية تأثر أداء المنظومة بهاتين الأداة من حيث تعزيز أداء المنظومة.

الجدول (7) فولتيات وزوايا العموميات للحملين (الأساس والحمل 125%) عند الزاوية 9 للمحولة عند وجود المحولة في الخط 4-11

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة			
	عند عدم وجود المحولة		الزاوية 9° للمحولة	
	الفولتية	الزاوية	الفولتية	الزاوية
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9769	-15.7678	0.9763	-18.176
3	0.9824	-16.2966	0.9824	-18.57
4	0.9892	-10.3525	0.9884	-13.221
5	0.9966	-8.8332	0.9943	-10.773
6	0.9758	-16.3350	0.9755	-18.63
7	0.9797	-13.8028	0.9791	-16.520
8	0.9492	-17.1420	0.9484	-19.63
9	0.9635	-15.6655	0.9624	-18.30
10	0.9619	-15.9327	0.9609	-18.499
11	1.0000	-4.3971	1.0000	-3.9183
12	1.0000	-13.1926	1.0000	-14.472
13	1.0000	-15.3304	1.0000	-17.579
14	1.0000	-13.8028	1.0000	-16.520
الخطوط	الحمل 125%			
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9695	-20.4273	0.9689	-22.86
3	0.9776	-21.1010	0.9775	-23.40
4	0.9807	-13.5577	0.9800	-16.45
5	0.9885	-11.5859	0.9859	-13.54
6	0.9689	-21.1472	0.9686	-23.47
7	0.9713	-17.9243	0.9707	-20.67
8	0.9336	-22.1876	0.9329	-24.70
9	0.9507	-20.2925	0.9497	-22.96
10	0.9491	-20.6352	0.9482	-23.23
11	1.0000	-6.1847	1.0000	-5.702
12	1.0000	-17.2719	1.0000	-18.56
13	1.0000	-19.8824	1.0000	-22.15
14	1.0000	-17.9243	1.0000	-20.67

الجدول (8) نتائج انسيابية القدرة عند وجود المحولة في الخط 5-11

الخطوط	سريان القدرة في الخطوط	
	الحمل الأساس	
	الزاوية 3	الزاوية 6
1-11	1.5027 +0.5703i	1.4407 + 0.5859i
11-12	0.7818 - 0.1639i	0.8181 - 0.1664i
11-4	0.6291 - 0.1104i	0.7027 - 0.1223i
1-5	0.8393 +0.1089i	0.9077 + 0.1060i
11-5	0.4946 - 0.1459i	0.5900 - 0.1635i
12-4	-0.1896+0.108i	-0.1561 +0.0960i
4-5	-0.5094 -0.028i	-0.4127 - 0.0649i
5-13	0.4411 +0.0127i	0.4356 + 0.0110i
4-7	0.2826 +0.0531i	0.2862 + 0.0518i
7-14	0.0000 - 0.1124i	0.0000 - 0.1130i
4-9	0.1608 +0.0529i	0.1628 + 0.0522i
7-9	0.2826 +0.1478i	0.2862 + 0.1467i
9-10	0.0547 - 0.0016i	0.0581 - 0.0030i
13-2	0.0720 +0.0812i	0.0686 + 0.0826i
13-3	0.0792 +0.0312i	0.0788 + 0.0314i
13-6	0.1780 +0.0963i	0.1763 + 0.0970i
9-8	0.0937 +0.0083i	0.0959 + 0.0074i
10-2	-0.0354 -0.059i	-0.0320 - 0.0613i
3-6	0.0173 +0.0134i	0.0169 + 0.0136i
6-8	0.0575 +0.0462i	0.0553 + 0.0472i
الخطوط	الحمل 125%	
	الزاوية 3	الزاوية 6

تتأثر الفولتية لكافة العموميات، إذ تزداد الفولتية في عموميات وتقل في عموميات أخرى ولكن تكون نسبة الزيادة أو النقصان ضئيلة جداً لا تتجاوز النسبة المسموحة لها وهي 5%، الجدول (11) يوضح النتائج الخاصة بقيم الفولتيات والزوايا لهذه الحالة الدراسية .

الجدول (11) فولتيات وزوايا العموميات للحملين (الأساس والحمل 125%) عند وجود الأدوات في أن واحد

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة			
	عند عدم وجود المحولة		بعد إدخال الأدوات	
	الفولتية	الزوايا	الفولتية	الزوايا
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9769	-15.7678	0.9769	-16.186
3	0.9824	-16.2966	0.9824	-16.535
4	0.9892	-10.3525	0.9886	-10.894
5	0.9966	-8.8332	0.9960	-9.1874
6	0.9758	-16.3350	0.9760	-16.521
7	0.9797	-13.8028	0.9796	-14.385
8	0.9492	-17.1420	0.9496	-16.968
9	0.9635	-15.6655	0.9636	-16.268
10	0.9619	-15.9327	0.9619	-16.479
11	1.0000	-4.3971	1.0000	-4.3190
12	1.0000	-13.1926	1.0000	-15.055
13	1.0000	-15.3304	1.0000	-15.618
14	1.0000	-13.8028	1.0000	-14.384
الخطوط	الحمل 125%			
	عدم وجود المحولة		بعد إدخال الأدوات	
	الفولتية	الزوايا	الفولتية	الزوايا
1	1.0600	0	1.0600	0
2	0.9695	-20.4273	0.9694	-20.86
3	0.9776	-21.1010	0.9775	-21.31
4	0.9807	-13.5577	0.9799	-14.13
5	0.9885	-11.5859	0.9877	-11.95
6	0.9689	-21.1472	0.9691	-21.29
7	0.9713	-17.9243	0.9711	-18.55
8	0.9336	-22.1876	0.9338	-21.87
9	0.9507	-20.2925	0.9509	-20.95
10	0.9491	-20.6352	0.9492	-21.22
11	1.0000	-6.1847	1.0000	-6.108
12	1.0000	-17.2719	1.0000	-19.20
13	1.0000	-19.8824	1.0000	-20.16
14	1.0000	-17.9243	1.0000	-18.55

الشكل (3) يوضح المخطط الانسيابي للبرنامج المستخدم. أما الجداول (12) و (13) و (14) فتمثل مصفوفة المسابرة للمنظومة عند عدم إضافة الأدوات وعند وجود محولة الإزاحة الطورية وامتسعات التوالي على التوالي .

تم اختيار الخط 11-12، بينما تم اختيار ($K_S=60\%$) لمتسعة التوالي التي وضعت في الخط 8-9، يبين الجدول (10) نتائج انسيابية القدرة عند الحملين (الأساس والحمل 125% للمنظومة).

يلاحظ من خلال النتائج المعروضة في الجدول (10) أن وجود المحولة والمتسعة في المنظومة في خطين منفصلين أدى إلى تعزيز أداء المنظومة من خلال إعادة توزيع وتوجيه القدرة المنقولة في المنظومة.

الجدول (10) نتائج انسيابية القدرة عند وجود المحولة في الخط 11-12 والمتسعة في الخط 8-9

الخطوط	الحمل الأساس للمنظومة	انسيابية القدرة بعد إدخال الأدوات
1-11	1.5733 + 0.5529i	1.5508 + 0.5584i
11-12	0.7441 - 0.1611i	0.8703 - 0.1564i
11-4	0.5520 - 0.0943i	0.6090 - 0.1032i
1-5	0.7684 + 0.1161i	0.7970 + 0.1163i
11-5	0.4110 - 0.1318i	0.4517 - 0.1385i
12-4	-0.2245 + 0.1234i	-0.3357 + 0.178i
4-5	-0.6112 + 0.0167i	-0.6796 + 0.039i
5-13	0.4472 + 0.0119i	0.4425 + 0.0092i
4-7	0.2788 + 0.0534i	0.2818 + 0.0513i
7-14	0.0000 - 0.1128i	0.0000 - 0.1134i
4-9	0.1586 + 0.0531i	0.1603 + 0.0520i
7-9	0.2788 + 0.1490i	0.2818 + 0.1472i
9-10	0.0510 - 0.0004i	0.0418 - 0.0038i
13-2	0.0757 + 0.0801i	0.0849 + 0.0760i
13-3	0.0796 + 0.0310i	0.0770 + 0.0325i
13-6	0.1799 + 0.0958i	0.1686 + 0.0998i
9-8	0.0914 + 0.0091i	0.1053 + 0.0016i
10-2	-0.0391 - 0.0586i	-0.0482 - 0.0543i
3-6	0.0177 + 0.0131i	0.0151 + 0.0147i
6-8	0.0598 + 0.0454i	0.0461 + 0.0514i
الخطوط	الحمل 125%	انسيابية القدرة بعد إدخال الأدوات
1-11	2.0909 + 0.4349i	2.0687 + 0.4396i
11-12	0.9403 - 0.1728i	1.0635 - 0.1592i
11-4	0.6897 - 0.0759i	0.7492 - 0.0823i
1-5	0.9904 + 0.1403i	1.0201 + 0.1429i
11-5	0.5101 - 0.1096i	0.5522 - 0.1146i
12-4	-0.2796 + 0.199i	-0.3916 + 0.2588i
4-5	-0.7674 + 0.064i	-0.8387 + 0.0882i
5-13	0.5657 - 0.0042i	0.5591 - 0.0081i
4-7	0.3467 + 0.0576i	0.3509 + 0.0546i
7-14	0.0000 - 0.1583i	0.0000 - 0.1591i
4-9	0.1965 + 0.0646i	0.1989 + 0.0630i
7-9	0.3467 + 0.1891i	0.3509 + 0.1862i
9-10	0.0617 - 0.0058i	0.0509 - 0.0006i
13-2	0.0975 + 0.1072i	0.1084 + 0.1022i
13-3	0.1006 + 0.0402i	0.0972 + 0.0422i
13-6	0.2276 + 0.1251i	0.2134 + 0.1305i
9-8	0.1127 + 0.0090i	0.1302 - 0.0014i
10-2	-0.0510 - 0.0786i	-0.0617 - 0.0734i
3-6	0.0229 + 0.0172i	0.0196 + 0.0193i
6-8	0.0771 + 0.0609i	0.0600 + 0.0690i

- Circuit Analysis: Modeling and Control”, IEEE Proceeding, Vol.140. No. 4, p.p 331-336, July 1993.
6. Niaki, S. A. Nabavi, “A Novel Steady-State Model and Principles of Operation of Phase – Shifting Transformer Comparable with FACTS New Devices”, Proceedings of power system technology , Vol.3. pp 1450-1457, 2002.
7. Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P. H. and Kling, W. L., “Phase Shifting Transformers: Principles and Application”, International Conference on Future Power System , 6pp.-6, Nov. 2005.
8. Prabhakara, F. S., Ashok Kumar, B. S., Khincha, H. P. and Parthasarathy, K., “Effectiveness of Series Capacitors in Long Distance Transmission Lines” , IEEE Transaction on power Apparatus and Systems , Vol. PAS-89, No. 5/6, p.p941-951, May /June 1970.
9. Stagg, G. W. and El-Abiad, A. H., "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, pp 322-324, 1968.
- المصادر
1. Jahnson, B. K., Venkataramanan, G. and Manjrekar, M. “A Hybrid Solid State Phase Shifter for continuous Phase Shift Control in Transmission Lines”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 2, p.p851-854, 26 May 1996.
 2. Rylatt, P. E. and Cokkinides, G. J. "A Method for Planning Phase-Shifting Transformers using Linearized Network Sensitivities”, IEEE [Energy and Information Technologies in the Southeast](#), Vol. 2, p.p 832-836, 1989.
 3. Iwamoto, S., Satoh, T. and Tanaka, H., “ATC Improvement by Phase Shifter Application Considering Dynamic Rating”, North American [Power Symposium](#), pp 528-533, 2007.
 4. Andersson, G., and Noroozian, M., “Power Flow Control by use of Controllable Series Components”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp 1420-1429, July 1993.
 5. Youssef, R. D., “Phase Shifting Transformers in Load Flow and Short -