

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.311

ВИКОРИСТАННЯ FACTS ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

О.Ф. Буткевич^{1,2}, докт. техн. наук, І.А. Костиця²

1 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

2 – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна
e-mail: butkevych@ied.org.ua

Наведено деякі результати досліджень впливу гнучких систем передачі змінного струму, зокрема фазоповоротних трансформаторів та статичних тиристорних компенсаторів, на пропускну здатність електричних мереж. Представлені результати одержано з використанням тестової моделі енергосистеми (IEEE 14-bus system). Бібл. 10, рис. 5, табл. 4.

Ключові слова: режим енергетичної системи, пропускну здатність електричної мережі, FACTS, модальний аналіз.

Вступ. Сучасний етап розвитку електроенергетичних систем (ЕЕС) багатьох країн, насамперед високорозвинених, характеризується впровадженням під «прапором» концепції Smart Grid різних інноваційних технологій, серед яких важлива роль у реалізації зазначеної концепції належить кластеру гнучких систем передачі змінного струму – низці пристроїв силової електроніки різного функціонального призначення (для підвищення керованості потоків потужності, регулювання напруги, демпфірування низькочастотних коливань параметрів режиму ЕЕС, забезпечення статичної та динамічної стійкості ЕЕС та ін.), завдяки яким у загальному підсумку досягається ефективне використання електричних мереж (ЕМ) внаслідок зменшення їх неоднорідності та підвищення пропускну здатності. Такі пристрої позначають зазвичай узагальнюючою англійською аббревіатурою FACTS (від Flexible Alternating Current Transmission System). Широкі функціональні можливості FACTS обумовлені їх здатністю впливати на значення таких взаємопов'язаних параметрів, як напруга, струм, повний опір, кут фазового зсуву між векторами напруги по кінцях лінії електропередачі та ін. Відомі численні публікації, які стосуються опису, особливостей моделювання, діагностування, захисту в аварійних режимах роботи та розміщення в ЕЕС різних пристроїв FACTS, наприклад, [1–10]. У таких публікаціях ЕЕС подають переважно досить простою структурою, наприклад, [4, 5], детальніше розглядаючи особливості функціонування FACTS, але аналіз режиму ЕЕС у такому разі виявляється дещо «обмеженим» внаслідок зазначеного подання самої ЕЕС. У цій статті наведено результати експериментально-розрахункових досліджень з використанням широковідомої тестової моделі ЕЕС (IEEE 14-bus system), які свідчать про *режимну ефективність* застосування FACTS, зокрема таких представників FACTS, якими є фазоповоротний трансформатор (ФПТ) та статичний тиристорний компенсатор – СТК (СТК є загальним терміном для позначення реактора або батареї конденсаторів з тиристорним керуванням, а також їх комбінації). Висновок щодо ефективності використання FACTS зроблено в режимному, а не техніко-економічному аспекті, оскільки дослідження виконувалися з використанням зазначеної вище моделі ЕЕС, а в реальних ЕЕС швидкість окупності витрат, пов'язаних з використанням FACTS, залежить від особливостей конкретних ЕМ та потреби підвищення їхньої пропускну здатності, яку визначають з урахуванням умов експлуатації та

параметрів надійності функціонування ЕЕС. У більшості випадків реалізація оптимальних режимів ЕЕС завдяки використанню FACTS забезпечує швидку окупність останніх, незважаючи на відносно високі капітальні витрати, пов'язані з їх впровадженням. У дослідженнях використано програмне забезпечення DIGSILENT Power Factory.

Розрахунково-експериментальні дослідження застосування FACTS в ЕЕС. Загальну однолінійну схему зазначеної ЕЕС, на базі якої виконано дослідження (IEEE 14-bus system), зображено на рис. 1. До складу моделі ЕЕС входять два еквівалентних синхронних генератора СГ (приєднаних до шин 1 та 2) та три синхронних компенсатора СК (приєднаних до шин 3, 6 та 8).

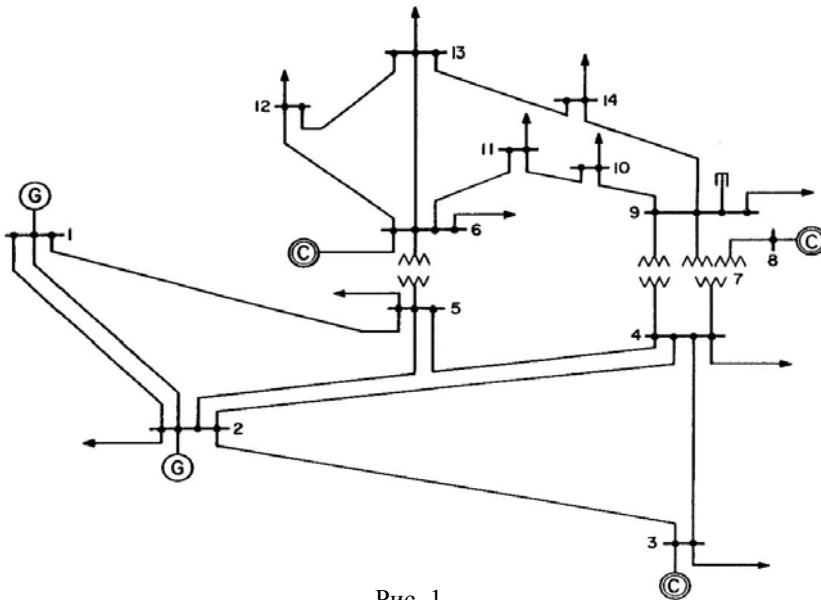


Рис. 1

Обидва трансформатори забезпечують регулювання напруги під навантаженням (РПН, $\pm 8 \times 1,78\%$). Споживання (відбирання) електроенергії відбувається на напрузі 220 та 110 кВ у всіх вузлах окрім першого (1-й СГ балансувальний). До шин 10 кВ (8-й вузол, без навантаження електроспоживання) приєднано СК та обмотку низької напруги 2-го трансформатора.

Оскільки серед задач аналізу режимів ЕЕС чільне місце належить визначенню пропускної здатності ЕМ та відповідних обмежень, зокрема в режимі сезонного максимуму навантажень, то дослідження спрямуємо на виявлення «вузьких місць» в ЕЕС, якщо такі виникнуть внаслідок обтяження режимів, та на заходи з підвищення пропускної здатності ЕМ (передбачаючи можливість використання FACTS), вважаючи, що початковий режим ЕЕС – це, наприклад, режим мінімальних навантажень, а обтяження режиму відбувається збільшенням потужності вузлових навантажень (пропорційно початковим значенням).

Характеристика початкового режиму. У початковому режимі усі СК вимкнено. Анцапси 1-го та 2-го трансформаторів знаходилися в положенні -1 та -3 відповідно. Одиниці вимірювання активної та реактивної потужностей залишатимуться незмінними – МВт та Мвар відповідно, тому далі їх у таблицях не зазначатимемо. Втрати активної потужності в початковому режимі складають близько 5,5%. Параметри цього режиму, які можуть характеризувати його в аспекті наявності «вузьких місць» в ЕМ, наведено в табл. 1, де завантаження повітряних ліній (ПЛ) зазначено також у відсотках від максимально допустимого за термічною стійкістю ПЛ струму – $I_{\text{мд}}$. Напругу вузлів зазначено у відносних одиницях (в.о.) – відносно відповідної номінальної напруги.

У початковому режимі значення напруги на шинах ЕЕС та завантаження ПЛ знаходяться в допустимих межах.

1-й етап обтяження режимів ЕЕС (без використання FACTS). Спочатку обтяження початкового режиму здійснювалося збільшенням (пропорційно початковим значенням) потужності електроспоживання в усіх вузлах ЕЕС та збільшенням потужності генерування другим СГ (на 20 МВт) та першим СГ (балансирувальним). Під час обтяження режимів рівні напруги підтримувалися за допомогою регулювальних можливостей СГ, СК та РПН трансформаторів. При досягненні 190% потужності електроспоживання (споживання у початковому режимі беремо за 100%) у вузлах 3 та 4 відбулося «просідання» напруги – до 0,935 та 0,938 відповідно, анцапси 1-го та 2-го трансформаторів знаходилися в положенні -6 та -8. Завдяки використанню СК напруга у вузлі 8 зросла з 0,968 до 1,010 в.о. (у початковому режимі усі СК було вимкнено). Втрати активної потужності у цьому режимі склали 10,72%.

Таблиця 1

ПЛ	Завантаження ПЛ		Вузли ЕЕС	Потужність генерування		Потужність електроспоживання		Напруга, в.о.
	потік активної потужності	струм, % від $I_{\text{мд}}$		активна	реактивна	активна	реактивна	
1-2/1	77,91	41,18	1	232,94	112,22	-	-	1,050
1-2/2	77,91	41,18	2	40,0	50	21,70	12,70	1,050
1-5	77,10	41,27	3	0	0	94,20	19,0	1,039
10-11	-6,01	14,17	6	0	0	11,20	7,50	1,049
12-13	1,79	3,96	8	0	0	-	-	0,968
13-14	6,88	15,36	10	-	-	9,0	5,80	1,041
2-3	73,14	37,87	11	-	-	3,50	1,80	1,041
2-4	54,96	30,30	12	-	-	6,10	1,60	1,035
2-5	41,40	24,37	13	-	-	13,50	5,80	1,031
3-4	-23,71	16,65	14	-	-	14,90	5,0	1,023
4-5	-59,38	28,88	4	-	-	47,80	-3,90	1,043
6-11	9,59	20,87	5	-	-	7,60	1,60	1,049
6-12	7,96	17,83	9	-	-	29,50	16,60	1,049
6-13	18,60	42,49	Сумарна потужність	272,94	162,22	259,0	73,5	-
9-10	3,04	19,26						
9-14	8,21	22,47						

Таблиця 2

ПЛ	Завантаження ПЛ		Вузли ЕЕС	Потужність генерування		Потужність електроспоживання		Напруга, в.о.
	потік активної потужності	струм, % від $I_{\text{мд}}$		активна	реактивна	активна	реактивна	
1-2/1	166,39	84,39	1	488,70	153,89	-	-	1,050
1-2/2	166,39	84,39	2	60	50	41,23	24,13	1,058
1-5	155,90	76,51	3	0	38	178,98	36,1	1,030
10-11	-11,91	28,02	6	0	23	21,28	14,25	1,050
12-13	3,49	7,87	8	0	23	-	-	0,998
13-14	13,35	30,17	10	-	-	17,1	11,02	1,033
2-3	141,81	68,27	11	-	-	6,65	3,42	1,034
2-4	108,29	54,93	12	-	-	11,59	3,04	1,023
2-5	80,61	41,01	13	-	-	25,65	11,02	1,014
3-4	-46,96	25,11	14	-	-	28,31	9,5	0,997
4-5	-114,82	61,04	4	-	83,79	90,82	-7,41	1,05
6-11	18,87	41,02	5	-	-	14,44	3,04	1,044
6-12	15,37	34,56	9	-	-	56,05	31,54	1,048
6-13	35,53	82,64	Сумарна потужність	548,7	371,68	492,1	143,07	-
9-10	5,38	36,59						
9-14	15,71	43,52						

Оскільки регулювальних можливостей наявних засобів виявилось вже недостатньо для підвищення рівня напруги, то у вузлі 4 було «встановлено» регульоване джерело реактивної потужності, яким є СТК. Це дало змогу підвищити рівень напруги і продовжити обтяження режиму ЕЕС, оскільки найбільш завантажені ПЛ (6-13, 1-2/1, 1-2/2 та 1-5) ще мали певні «запаси» за струмом $I_{\text{мд}}$. Параметри обтяженого режиму ЕЕС з урахуванням встановленого СТК наведено в табл. 2. Анцапфи 1- та 2-го трансформаторів знаходилися в положенні -1 та -4 відповідно. Втрати активної потужності у цьому режимі склали 10,32 %. Рівні напруги та завантаження ПЛ знаходилися в допустимих межах.

2-й етап обтяження режимів ЕЕС. У 4-му вузлі знаходиться СТК. Обтяження виконували у той же спосіб, як і раніше (але для покриття використовували лише 1-й СГ), контролюючи допустимість значень напруги на шинах (у вузлах) та навантажень ПЛ. При збільшенні сумарної потужності електроспоживання до 220 % навантаження ПЛ 1-2/1 та 1-2/2 досягло майже гранично допустимого значення за струмом $I_{\text{мд}}$, а навантаження ПЛ 6-13 було близьким до цього. Рівні напруги знаходилися в допустимих межах. Анцапфи 1- та 2-го трансформаторів знаходилися в положенні -2 та -5 відповідно. Параметри обтяженого режиму ЕЕС, що відповідає 220 % потужності електроспоживання, наведено в табл. 3. Втрати активної потужності склали 12,46 %.

Таблиця 3

ПЛ	Завантаження ПЛ		Вузли ЕЕС	Потужність генерування		Потужність електроспоживання		Напруга, в.о.
	потік активної потужності	струм, % від $I_{\text{мд}}$		активна	реактивна	активна	реактивна	
1-2/1	201,71	99,06	1	590,87	121,41	-	-	1,050
1-2/2	201,71	99,06	2	60,0	50	47,74	27,94	1,040
1-5	187,44	90,53	3	0	38	207,24	41,8	0,999
10-11	-14,46	34,17	6	0	24	24,64	16,5	1,049
12-13	4,13	9,35	8	0	24	-	-	1,003
13-14	15,84	36,04	10	-	-	19,8	12,76	1,031
2-3	163,53	79,27	11	-	-	7,7	3,96	1,031
2-4	128,19	66,83	12	-	-	13,42	3,52	1,017
2-5	94,59	48,93	13	-	-	29,7	12,76	1,007
3-4	-57,42	30,06	14	-	-	32,78	11	0,987
4-5	-135,39	78,30	4	-	171,83	105,16	-8,58	1,05
6-11	22,60	49,14	5	-	-	16,72	3,52	1,032
6-12	17,94	40,40	9	-	-	64,9	36,52	1,047
6-13	41,43	96,92	Сумарна потужність	650,87	429,24	569,8	161,7	-
9-10	5,63	43,02						
9-14	17,99	50,69						

3-й етап обтяження режимів ЕЕС. Враховуючи завантаження ПЛ 1-2/1 та 1-2/2, подальше обтяження режиму виконувалося, як і раніше, пропорційним збільшенням потужності електроспоживання, але для покриття такого збільшення було залучено СГ у вузлі 2, вважаючи, що тут існують достатні резерви потужності генерування. Обтяження режимів продовжувалося, але «вузьким місцем» стала ПЛ 6-13 внаслідок досягнення обмеження за струмом $I_{\text{мд}}$. Щоб розвантажити зазначену ПЛ, на її початку (вузол 6) було встановлено ФПТ, завдяки чому обтяження режимів було продовжено до досягнення 270 % потужності електро-

споживання. Кут фазового зсуву напруги на виході ФПТ по відношенню до напруги на вході становив 9 град. (це значення кута призводить до максимально можливого розвантаження ПЛ 6-13). Анцапси 1-го та 2-го трансформаторів знаходилися в положенні -4 та -7 відповідно. Параметри обтяженого режиму ЕЕС наведено в табл. 4 (за даного режиму чотири ПЛ досягли максимально допустимого навантаження за струмом $I_{\text{мд}}$, навіть дещо його перевищили – у межах 1 %). Втрати активної потужності склали 14,17 %.

Таблиця 4

ПЛ	Завантаження ПЛ		Вузли ЕЕС	Потужність генерування		Потужність електроспоживання		Напруга, в.о.
	потік активної потужності	струм, % від $I_{\text{мд}}$		активна	реактивна	активна	реактивна	
1-2/1	203,53	98,82	1	624,78	84,11	-	-	1,05
1-2/2	203,53	98,82	2	190,0	50	58,59	34,29	1,026
1-5	217,70	100,26	3	0	38	254,34	51,3	0,950
10-11	-17,72	41,81	6	0	24	30,24	20,25	1,053
12-13	20,99	52,46	8	0	24	-	-	1,014
13-14	21,95	50,81	10	-	-	24,3	15,66	1,029
2-3	204,64	100,17	11	-	-	9,45	4,86	1,030
2-4	173,22	89,81	12	-	-	16,47	4,32	1,019
2-5	131,17	66,71	13	-	-	36,45	15,66	0,996
3-4	-72,86	42,52	14	-	-	40,23	13,5	0,973
4-5	-158,33	100,99	4	-	313,77	129,06	-10,53	1,05
6-11	27,83	60,27	5	-	-	20,52	4,32	1,014
6-12	39,17	84,96	9	-	-	79,65	44,82	1,050
6-13	38,57	100,89	Сумарна потужність	814,78	533,88	699,3	198,45	-
9-10	7,022	52,84						
9-14	20,074	62,31						

Додатковий аналіз результатів обтяження режимів ЕЕС. На рис. 2 наведено діаграму зміни навантажень ПЛ (вісь ординат «проградує» у відсотках від струму $I_{\text{мд}}$) під час обтяження режимів ЕЕС (вісь абсцис «проградує» у відсотках від потужності електроспоживання у початковому режимі).

З діаграми видно, що після досягнення сумарної потужності електроспоживання у 190 % від потужності у початковому режимі та встановлення СТК у 4-му вузлі (на осі абсцис цій ситуації відповідає позначка 190+) значна частина ПЛ «розвантажилася» (це спостерігається на ділянці осі абсцис від 190 до 190+). Після використання ФПТ на ПЛ 6-13 відбувається стрімке зростання навантаження ПЛ 6-12 та ПЛ 12-13 (це спостерігається на ділянці осі абсцис від 220 до 270), у той час, як зростання навантаження ПЛ 6-13 дещо сповільнилося (зменшився кут нахилу до осі абсцис відповідного відрізка ламаної лінії 6-13). Після досягнення обмежень за струмом $I_{\text{мд}}$ для чотирьох ПЛ (див. табл. 2) обтяження режиму ЕЕС було припинено.

Результати модального аналізу, який виконано для режимів ЕЕС, вказують на те, що з обтяженням режимів відбувався рух максимального дійсного кореня характеристичного рівняння ЕЕС (суть власного значення характеристичної матриці ЕЕС) у напрямі уявної осі комплексної площини (у початковому режимі цей корінь дорівнював $-0,12 \text{ c}^{-1}$). Уявлення про рух власних значень характеристичної матриці ЕЕС на комплексній площині в процесі обтяження режимів дають окремі «знімки» лівої комплексної півплощини, що відповідають

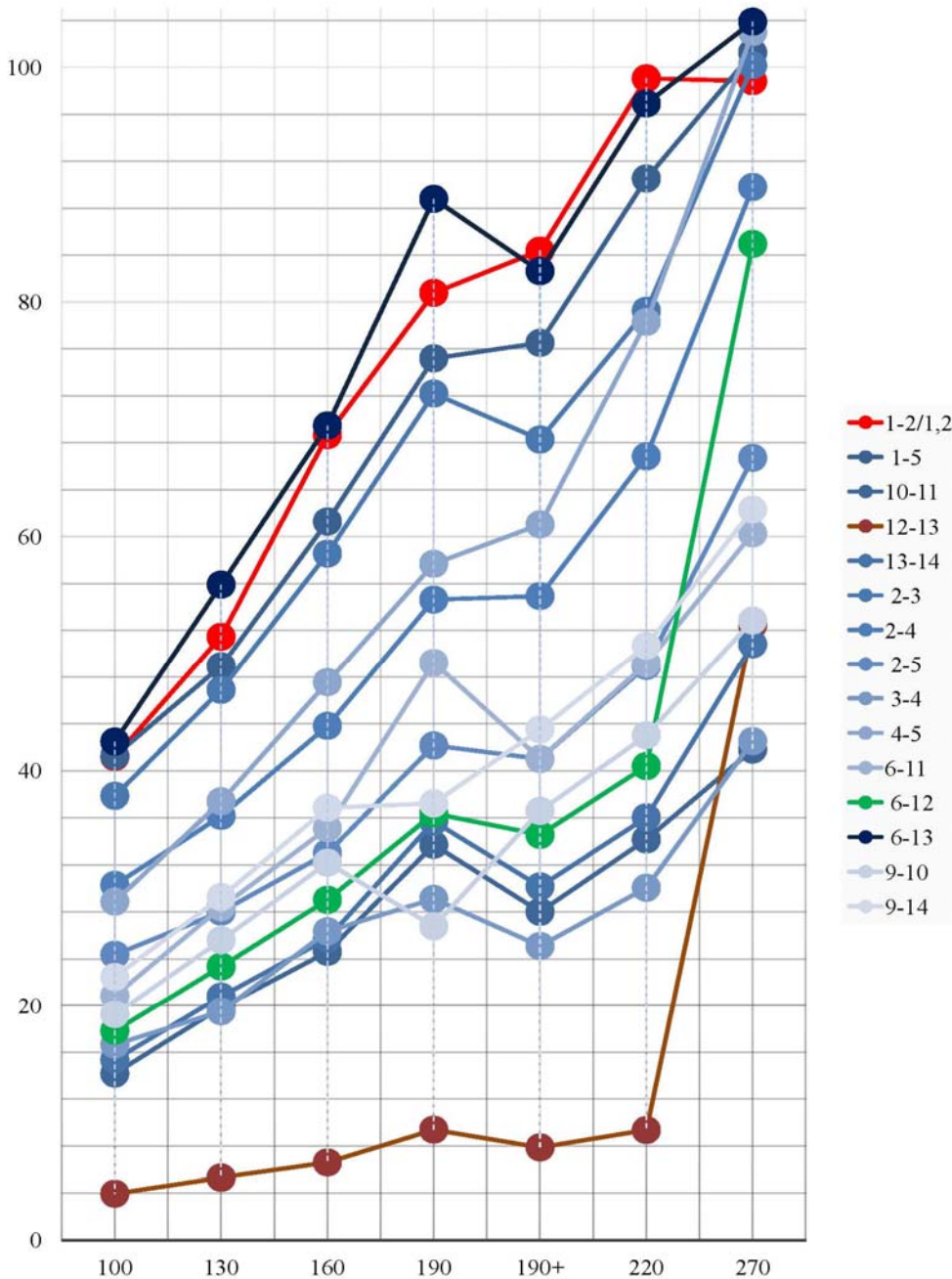


Рис. 2

різним обтяженим режимам ЕЕС. На рис. 3 показано власні значення характеристичної матриці ЕЕС (обтяження режиму становить 190 % від початкового): максимальний дійсний корінь дорівнює $-0,081 \text{ с}^{-1}$; на рис. 4 – власні значення характеристичної матриці ЕЕС (обтяження режиму становить 270 % від початкового): максимальний дійсний корінь дорівнює $-0,052 \text{ с}^{-1}$.

У разі «скасування» обмежень за струмом $I_{\text{мд}}$ під час моделювання режимів ЕЕС зазначене обтяження могло б продовжуватися аж до 330 % потужності електроживлення з виникненням аперіодичного порушення стійкості ЕЕС (і незбіжності ітераційного процесу розрахунку такого обтяженого

режиму ЕЕС, який неможливо фізично реалізувати), про що свідчить «перехід» максимального дійсного власного значення відповідної характеристичної матриці ЕЕС до правої («нестійкої») комплексної півплощини. На рис. 5 показано власні значення характеристичної матриці ЕЕС (обтяження режиму становить 330 % від початкового): максимальне дійсне значення «перейшло» до правої комплексної півплощини.

Що ж стосується комплексно-спряжених власних чисел характеристичної матриці ЕЕС, то їх значення свідчать про відсутність загрози виникнення слабодемпфіваних коливань режимних параметрів протягом усієї траєкторії обтяження режимів ЕЕС, оскільки усім модам відповідають значні коефіцієнти демпфування. Наприклад, для останнього обтяженого режиму ЕЕС з урахуванням обмежень (табл. 4) доміантна пара власних значень (нехай це буде i -та пара) становить $\alpha_i \pm j\omega_i = -1,48 \pm j10,29$. Отже, на частоті цієї моди (10,29 рад./с \cong 1,64 Гц) коефіцієнт демпфування становить $\xi_i = -\alpha_i / (\alpha_i^2 + \omega_i^2)^{-0,5} = 0,14$ (виникнення слабодемпфіваних коливань режимних параметрів можливе, якщо значення коефіцієнта демп-

фірування менше від 0,05). Для порівняння: для обтяженого режиму ЕЕС зі 190 % потужністю електроспоживання доміантна пара власних значень становить $\alpha_i \pm j\omega_i = -2,39 \pm j11,67$ і відповідний коефіцієнт демпфірування $-\xi_i = 0,20$.

Висновки. Результати експериментально-розрахункових досліджень свідчать, що режимно обгрунтоване впровадження в ЕЕС FACTS, зокрема СТК та ФПТ, надає можливість усунути «вузькі місця» та підвищувати пропускну здатність ЕМ. У разі реальних ЕЕС висновки щодо режимної доцільності впровадження FACTS повинні підкріплюватися техніко-економічним обгрунтуванням, в якому слід враховувати також вплив інших чинників, зокрема і таких, як перспективи зростання потужності електроспоживання в режимах максимальних навантажень.

1. Добрусин Л.А. Тенденции применения фазопоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. – 2012. – № 4. – С. 60–66.
2. Ольшванг М.В. Роль фазосдвигающих трансформаторов в развитии современных сетей 110-765 кВ. "Электротехника 2010", VIII симпозиум: Перспективные виды электрооборудования для передачи и распределения электроэнергии. – М.: ВЭИ-ТРАВЕК, 23-27 мая 2005.
3. Стельмаков В.Н., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А., Панфилов Д.И. Фазопоротное устройство [Электронный ресурс] URL: <http://poleznayamodel.ru/model/10/107421.html/> (дата звернення: 03.05.16).
4. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с фазопоротными устройствами (Часть 1) // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 16–25.
5. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с фазопоротными устройствами (Часть 2) // Электричество. – 2014. – № 8. – С. 9–18.

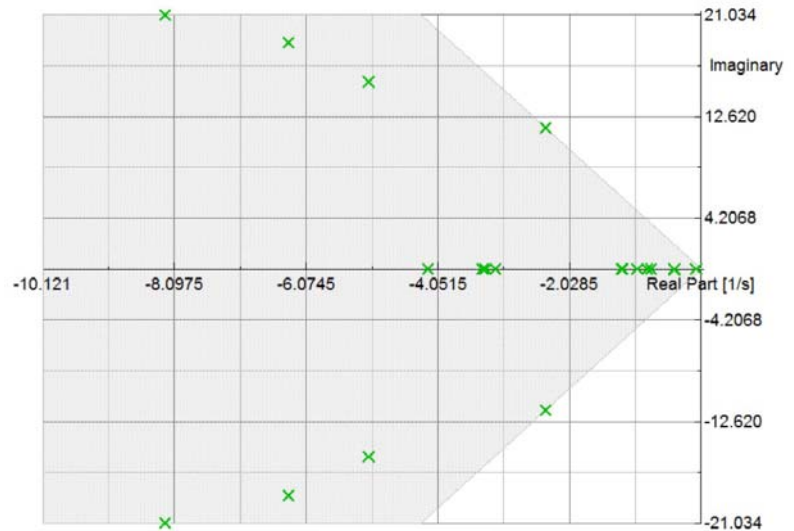


Рис. 3

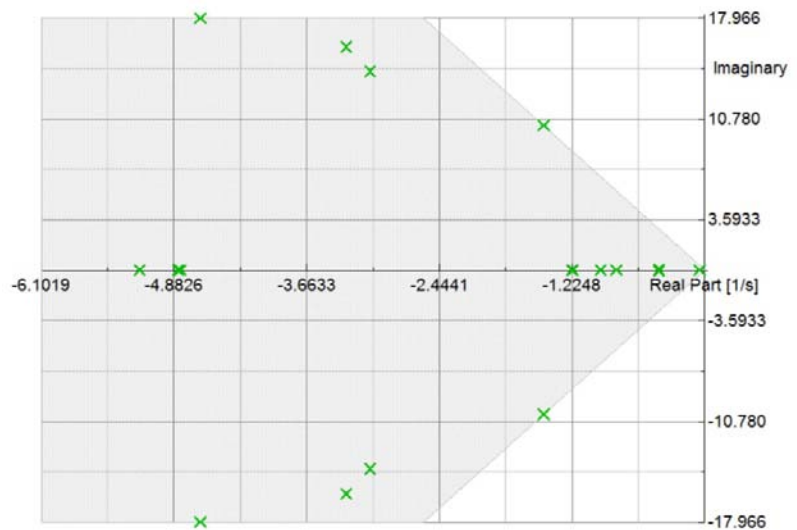


Рис. 4

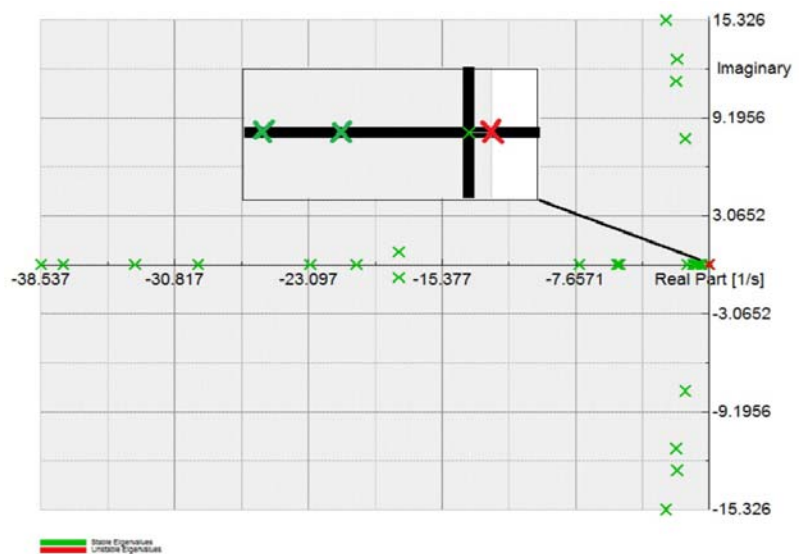


Рис. 5

6. Dhoble P., Bhandakkar A. Review of Active Reactive Power Flow Control Using Static Synchronous Series Compensator (SSSC) // International Journal for Research and Development in Engineering (IJRDE). – 2013. – Vol. 1. – Issue. 3. – P. 74–82.
7. Dubey R.K., Suman S.K. Control of Power System Stability through FACTS // International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS) – 2015. – Vol. 1. – Issue 8. – P. 352–359.
8. Hingorari N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press. – 2000. – 432 p.
9. Padiyar K.R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. – Published by New Age International (P) Ltd., Publishers. – 2007. – 532 p.
10. Sambasivarao N., Amarnath J., Purnachandrarao V. Congestion management using FACTS devices in deregulated power system // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – Issue 11. – P. 90–95.

УДК 621.311

А.Ф. Буткевич^{1,2}, докт. техн. наук, **И.А. Костыря**²

1 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

2 – Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Использование FACTS для повышения пропускной способности электрических сетей

Приведены некоторые результаты исследований влияния гибких систем передачи переменного тока, в частности фазоворотных трансформаторов и статических тиристорных компенсаторов, на пропускную способность электрических сетей. Представленные результаты получены с использованием тестовой модели энергосистемы (IEEE 14-bus system). Библиография 10, рис. 5, табл. 4.

Ключевые слова: режим энергетической системы, пропускная способность электрической сети, FACTS, модальный анализ.

O.F. Butkevych^{1,2}, **I.A. Kostyrya**²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremohy, 37, Kyiv -56, 03056, Ukraine

Using FACTS to maximize available transfer capability of electric networks

Some study results of the impact of flexible alternating current transmission systems, in particular the phase-shifting transformers and static thyristor compensators, with regarding to an available transfer capability of electric networks are presented. These results were obtained using the power system's model (IEEE 14-bus system). References 10, figures 5, tables 4.

Key words: power system operational condition, available transfer capability of electric network, FACTS, modal analysis.

Надійшла 01.07.2016

Received 01.07.2016

УДК 621.315.1

ЭКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В.В. Кучанський, канд. техн. наук

Институт электродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: kuvlad@yandex.ru

Дослідження умов виникнення, характеру розвитку та можливих наслідків аномальних режимів електричних мереж з екстремальними значеннями параметрів режимів, таких як перенапруги, традиційно виконують за допомогою математичних моделей з лінійними і симетричними елементами. Це пояснюється великим досвідом розробки та використання моделей такого класу на практиці, оскільки основою прийняття рішень під час проектування та експлуатації мереж є результати моделювання перш за все нормальних режимів. Одночасно