

УДК 621.311.661

М.М. КУЛИК, академік НАН України, д-р техн. наук, професор, ORCID: 0000-0002-5582-7027
О.В. ЗГУРОВЕЦЬ, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-8439-9781
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

РОЛЬ І МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ ПОХІДНИХ ВІД РЕГУЛЮЮЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ЧАСТОТИ В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВІТРОВИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Вивчено роль та механізми впливу похідних від потужностей вітрових електростанцій та регулюючих генераторів на стабілізацію частоти в об'єднаних енергосистемах. У процесі аналізу отриманих результатів було введено новий якісний показник R , що відповідає відношенню максимального модуля похідної від потужності регулятора до максимального модуля похідної від потужності вітрової електростанції. Використання вказаного показника дозволило визначити необхідну швидкість регуляторів для забезпечення надійного регулювання частоти та потужності в енергосистемі з вітровими електростанціями. Зокрема, було визначено, що зі збільшенням значення показника R покращується якість регулювання частоти та потужності в енергосистемі та досягається найкращою при $R = 1$. Також було встановлено, що подальше підвищення швидкодії регулятора не надає додаткових технологічних переваг, однак може погіршувати його економічні показники.

К л ю ч о в і с л о в а: частота, регулювання, потужність, швидкодія, енергосистема, вітрова електростанція, акумуляторна батарея.

Вступ. Дослідженнями, результати яких наведені, зокрема, в [1, 2], встановлено, що в енергосистемах з вітровими електростанціями (ВЕС) нормована стабільність частоти може бути забезпечена при виконанні трьох найважливіших умов: діапазон зміни потужності регулятора повинен бути співставним із відповідним діапазоном ВЕС; швидкодія регулятора повинна бути співставною зі швидкістю зміни потужності ВЕС; сума потужностей ВЕС та регулятора у кожний момент часу повинна дорівнювати потужності (уставці потужності), яку вимагає диспетчерське управління енергосистеми. Зазначені умови можуть забезпечуватись при різних законах регулювання та способах їх реалізації. В [1, 2] розглянуто та досліджено пропорційно-диференційно-інтегральний, адаптивний закони та їх комбінація. Є підстави стверджувати, що в них враховані перша і третя із зазначених умов. Друга умова фігурує в цих законах опосередковано.

У даній статті більш детально і предметно досліджено механізми впливу похідних від потужностей вітрових електростанцій та регулюючих генераторів на стабілізацію частоти в об'єднаних енергосистемах.

Математична модель. Для проведення зазначених досліджень використано математичну модель, що є різновидом моделі, наведеної в [2], і яка має вигляд (1) – (9)

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^I P_{zi}(t) + P_{AB}(t) - P_n(t) - P_m(t) + P_{BEC}(t)}{T_c P_{\Sigma z0} \omega(t)} \omega_0^2, \quad (1)$$

$$\frac{dP_{zi}(t)}{dt} = \frac{P_{z0i} - P_{zi}(t) + B_{zi}(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_{zi}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \frac{P_{n0} - P_n(t) + C_n(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_n}, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{BEC}(t)}{dt} = \frac{B_{BEC}(\omega(t) - \omega_0) + P_{BEC}(v_g(t)) - P_{BEC}(t)}{T_{BEC}}, \quad (4)$$

$$P_{BEC}(v_g) = c_0 + c_1 v_g + c_2 v_g^2 + \dots + c_n v_g^n, \quad (5)$$

$$v_g(t) = \frac{1}{2} A_{v0} + \sum_{k=1}^N (A_{vk} \cos k \omega_0 t + B_{vk} \sin k \omega_0 t), \quad (6)$$

$$A_{vk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N} \left(v_g(t_n) \cos \frac{2\pi k}{T} t_n \right), \quad k = 0, 1, \dots, N, \quad (7)$$

© М.М. КУЛИК, О.В. ЗГУРОВЕЦЬ, 2020

$$B_{vk} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{2N} \left(v_g(t_n) \sin \frac{2\pi k}{T} t_n \right), k = 0, 1, \dots, N, (8)$$

$$P_{AB}(t) = U_{\delta}(t) - P_{BEC}(t), (9)$$

де T_c – постійна часу енергосистеми, $P_{\Sigma 0}$ – сумарна номінальна потужність генераторів; $P_{zi}(t)$, $P_n(t)$, $P_{AB}(t)$, $P_{BEC}(t)$, $P_m(t)$ – шукані змінні-функції потужностей, що відповідають генераторам, навантаженню, акумуляторній батареї (АБ), ВЕС та втратам мережі відповідно; τ_{zi} , τ_n , T_{BEC} – постійні часу генераторів, навантаження та ВЕС відповідно; T – інтервал часу, на якому досліджуються процеси регулювання в енергосистемі; N – кількість натуральних замірів швидкості вітру v_g на всьому інтервалі часу; A_{vk} , B_{vk} – коефіцієнти дискретного перетворення Фур'є; $U_{\delta}(t)$ – уставка (завдання) диспетчерського центру для покриття графіка електричних навантажень.

У системі (1) – (9) діють, окрім того, обмеження на рівень регулюючої потужності АБ, на швидкість її зміни та на зону нечутливості регулятора [1, 2]. На відміну від [1, 2] у проведених числових експериментах додатково обчислювались похідні від потужностей ВЕС, АБ та їх суми.

Дослідження проводились на розрахунковій схемі, наданій на рис. 1. Вона містить еквівалентні теплові, атомні та гідроелектростанції великої потужності, а також навантаження та потужні ВЕС і АБ. Показники і параметри зазначених елементів розрахункової схеми наведено в табл. 1.

Нижче наведені результати цифрового моделювання процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемі по схемі рис. 1.

Параметри елементів розрахункової схеми, початкові умови величин, що моделюються, та таблиця значень величин швидкості вітру на інтервалі дослідження наведені в табл. 1, 2. Метою проведеного комплексу цифрового моделювання було встановити механізм стабілізації частоти в енергосистемі з потужною ВЕС і зовнішнім регулятором (АБ) та впливу похідних потужностей ВЕС і регулятора на частоту в енергосистемі.

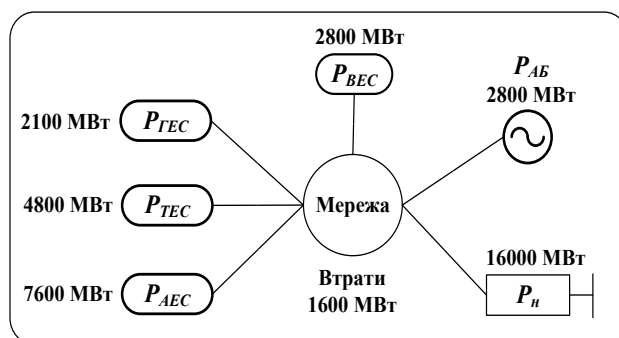


Рис. 1. Агрегована розрахункова схема енергосистеми

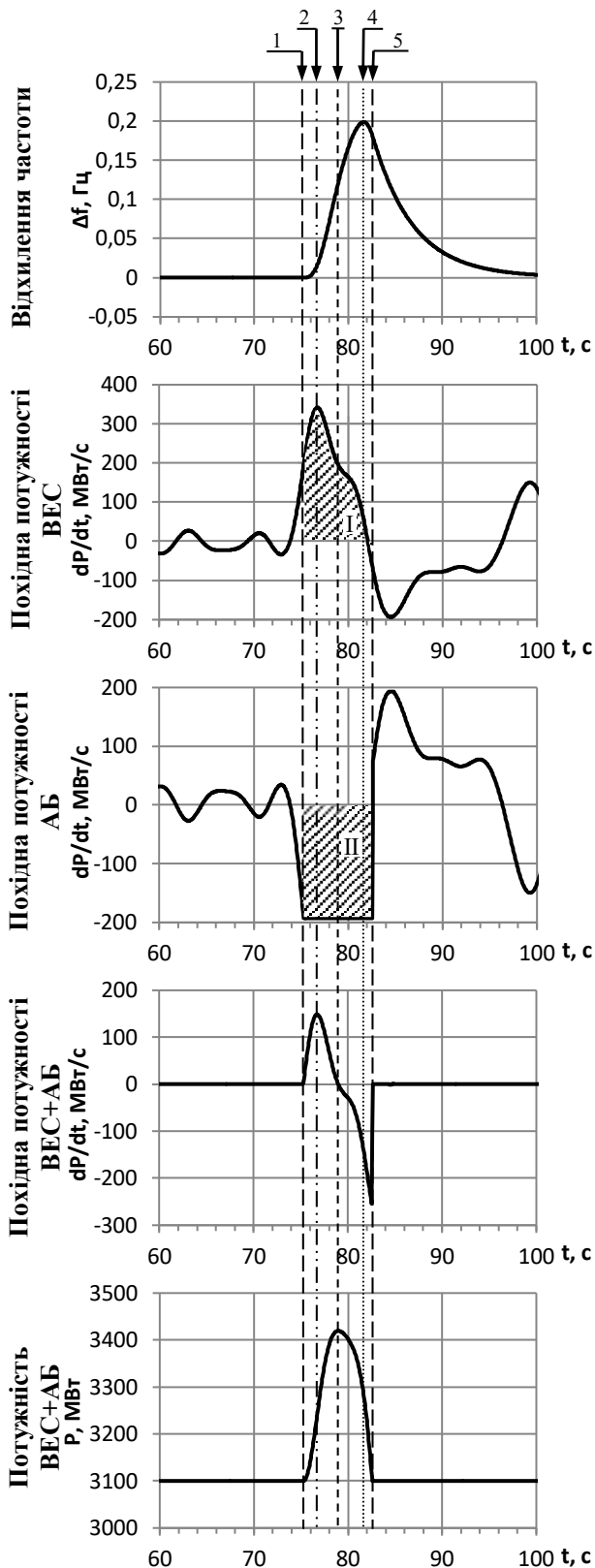
В табл. 2 представлений процес регулювання частоти в енергосистемі по рис. 1, в якій модуль максимального відхилення частоти спостерігається на 81,5 с і становить 0,1981 Гц, тобто, практично співпадає з максимально допустимим його значенням для ОЕС України. У цій точці похідна $|dP_{AB}/dt| = 193,2$ МВт/с, або 6,9% від $P_{AB \max}/c$. Максимальне значення похідної від потужності $dP_{BEC}/dt = 337,22$ МВт/с зафіксоване у точці $t = 76,5$ с і становить 12% від $P_{BEC \max}/c$. У системі протягом 7,5 с ($75,5 \leq t \leq 82,5$; с) діє обмеження на швидкодію регулятора $L_{AB} = |dP_{AB}/dt| \leq 6,9\% P_{AB \max}/c$, що становить 193,2 МВт/с. За межами цього діапазону на всьому часовому інтервалі, що досліджується, максимальне відхилення частоти $|\Delta f| < 0,2$ Гц, що задовольняє вимоги ОЕС України.

Механізм стабілізації частоти в енергосистемі з потужною ВЕС та генератором-регулятором (АБ) зі швидкодією 6,9% $P_{AB \max}/c$ відображений на рис. 2.

Починаючи з моменту часу $t_0 = 0$ с і до моменту часу, вказаного на рис. 2 позначкою 1, похідна потужності ВЕС не перевищує обмеження по швидкодії регулятора (модуль максимально допустимого значення похідної потужності регулятора). Такі умови дозволяють регулятору відслідковувати зміни потужності ВЕС, компенсуючи їх для отримання заданого диспетчером показника сумарної потужності ВЕС + регулятор-генератор (АБ).

Таблиця 1. Параметри моделі енергосистеми по рис. 1

Назва елемента енергосистеми	Крутизна частотної характеристики, МВт/1/с	Пост. часу, с	Початкова потужність, МВт	Макс. потужність, МВт	Відносна швидкість скидання/набору потужності, % $P_{AB \max}/c$
ГЕС	0,37	5	2100	–	–
ТЕС	0,73	5	4800	–	–
АЕС	1,81	5	7600	–	–
Навантаження	153	0,5	16000	–	–
АБ	–	–	1420	2800	6,9; 10,3; 12; 714
ВЕС	0,4	5	1680	2800	–
Втрати	–	–	1600	–	–



1. Початок обмеження швидкості АБ
2. Максимум відхилення похідної ВЕС + АБ
3. Максимум сумарної потужності ВЕС + АБ
4. Максимум відхилення частоти
5. Кінець обмеження швидкості АБ

Рис. 2. Механізм стабілізації частоти

У момент часу, що відповідає позначці 1, похідна потужності ВЕС досягає значення, що відповідає максимально допустимому значенню модуля похідної потужності АБ, та продовжує збільшуватися до моменту часу, вказаного позначкою 2. В той же час АБ, починаючи з позначки 1, досягла максимальної швидкодії і подальше зростання її потужності відбувається поступово з постійною швидкістю $6,9\% P_{AB\max} / c$, що відповідає $193,2 \text{ МВт}/c$.

Незважаючи на достатню встановлену потужність АБ, така різниця в швидкодях призводить до того, що сумарна потужність ВЕС та АБ починає відхилятися від встановленої диспетчером потужності 3100 МВт до значення $3419,4 \text{ МВт}$, створюючи позитивний небаланс потужності в системі, пік якого спостерігається в момент часу за позначкою 3.

Регулятор АБ зменшує свою потужність для компенсації зростання потужності ВЕС, але через обмеження по швидкодії з кожним моментом часу його відставання збільшується. Графічно потужність, що досягається ВЕС та АБ, відповідає площі під графіками похідних потужності, та зображена на рис. 2 у вигляді заштрихованої зони I та II відповідно. З рис. 2 видно, що навіть в момент часу, коли похідна потужності ВЕС повертається в зону, допустиму для АБ по швидкодії, регулятор продовжує набирати потужність, зменшуючи своє відставання, аж поки площа під графіками похідних не зрівняється. Лише в момент часу за позначкою 5 потужність регулятора досягає потужності ВЕС і починає знов відслідковувати її на заданому рівні уставки.

Отриманий небаланс потужності в процесі відставання АБ по швидкодії від ВЕС призводить до появи відхилення частоти, що набуває максимального значення $0,2 \text{ Гц}$ на позначці 4 і триває певний час навіть після того, як потужність регулятора знов синхронізується з потужністю ВЕС.

Для дослідження ролі похідних від потужностей вітрових електростанцій та регулятора в процесі стабілізації частоти в об'єднаній енергосистемі автори провели цикл розрахунків перехідних процесів, у яких параметри всіх елементів відповідають схемі по рис. 1 та табл. 1. Змінною величиною була швидкість регулятора (АБ), показники якої також надано в табл. 1.

Як видно із табл. 2, найбільші значення відхилення частоти в системі спостерігаються у часовому інтервалі $76,5 \leq t \leq 83 \text{ (с)}$. Це явище зумовлене тим, що на цьому інтервалі потужність $P_{ВЕС}(t)$ та її похідна $dP_{ВЕС}/dt$ мають максимальні значення. Тому в подальшому без завад для узагальнень будуть наведені ключові показники перехідних процесів саме в цьому часовому інтервалі.

У табл. 3 наведені фрагменти процесів регулювання частоти в енергосистемі для характерних варіантів значень досяжної швидкодії регулятора у зазначеному часовому інтервалі.

Таблиця 2. Процес регулювання частоти в енергосистемі з ВЕС та АБ, у якій відносна похідна від потужності АБ $|L_{AB}| \leq 6,9\%P_{AB\max}/c$ при відносній похідній від потужності ВЕС $|L_{BEC}| \leq 12,3\%P_{BEC\max}/c$

Час, с	Δf , Гц	Потужність, МВт							v_f , м/с	Похідна від потужності, МВт/с		
		ГЕС	ТЕС	АЕС	Навантаження	АБ	ВЕС	ВЕС+АБ		ВЕС	АБ	ВЕС+АБ
0,0	0,0000	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1420,0	1680,0	3100,00	7,60	0,00	0,00	0,00
0,5	0,0000	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1424,6	1675,4	3100,00	7,75	-0,63	0,64	0,01
•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
75,0	0,0000	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1780,9	1319,2	3100,07	8,31	145,58	-145,49	0,08
75,5	0,0001	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1689,9	1415,2	3105,04	8,94	229,45	-193,20	36,25
76,0	0,0024	2100,0	4800,0	7600,0	16000,7	1593,3	1550,2	3143,49	9,46	299,65	-193,20	106,45
76,5	0,0103	2100,0	4800,0	7600,0	16004,2	1496,7	1712,0	3208,63	9,80	337,22	-193,20	144,02
77,0	0,0252	2100,0	4800,0	7600,0	16012,7	1400,1	1881,9	3281,93	9,96	336,46	-193,20	143,26
77,5	0,0463	2100,0	4800,0	7600,1	16027,2	1303,5	2042,6	3346,12	9,96	306,11	-193,20	112,91
78,0	0,0715	2100,0	4800,0	7600,1	16046,9	1206,9	2183,9	3390,78	9,88	262,55	-193,20	69,35
78,5	0,0979	2100,0	4800,1	7600,2	16070,0	1110,3	2303,6	3413,83	9,80	221,56	-193,20	28,36
79,0	0,1231	2100,1	4800,1	7600,3	16094,3	1013,7	2405,7	3419,40	9,76	192,32	-193,20	-0,88
79,5	0,1458	2100,1	4800,2	7600,4	16117,7	917,1	2496,8	3413,90	9,77	175,42	-193,20	-17,78
80,0	0,1651	2100,1	4800,2	7600,5	16138,9	820,5	2581,4	3401,91	9,80	164,27	-193,20	-28,93
80,5	0,1808	2100,1	4800,3	7600,7	16157,2	723,9	2659,7	3383,54	9,80	148,59	-193,20	-44,61
81,0	0,1922	2100,2	4800,3	7600,8	16172,0	627,3	2726,6	3353,83	9,71	119,13	-193,20	-74,07
81,5	0,1981	2100,2	4800,4	7601,0	16182,5	530,7	2773,9	3304,53	9,52	71,94	-193,20	-121,26
82,0	0,1965	2100,2	4800,4	7601,1	16187,4	434,1	2793,4	3227,42	9,21	10,47	-193,20	-182,73
82,5	0,1846	2100,2	4800,5	7601,2	16184,7	337,5	2780,3	3117,82	8,82	-55,70	-193,20	-248,90
83,0	0,1654	2100,3	4800,5	7601,3	16173,3	364,3	2735,6	3099,94	8,41	-115,20	115,14	-0,05
83,5	0,1475	2100,3	4800,5	7601,3	16157,9	434,8	2665,1	3099,92	8,02	-159,59	159,55	-0,04
84,0	0,1314	2100,3	4800,5	7601,3	16142,0	522,5	2577,4	3099,91	7,71	-185,54	185,52	-0,02
84,5	0,1170	2100,3	4800,5	7601,3	16126,9	618,2	2481,7	3099,82	7,49	-193,94	193,20	-0,74
85,0	0,1042	2100,3	4800,5	7601,3	16113,2	714,1	2385,8	3099,91	7,39	-188,02	188,03	0,01
85,5	0,0927	2100,3	4800,5	7601,3	16100,8	804,0	2295,9	3099,91	7,38	-171,89	171,91	0,02
86,0	0,0825	2100,3	4800,5	7601,3	16089,8	884,1	2215,8	3099,93	7,43	-150,00	150,02	0,02
86,5	0,0735	2100,3	4800,5	7601,2	16079,9	952,7	2147,3	3099,94	7,51	-126,75	126,77	0,02
87,0	0,0655	2100,2	4800,5	7601,2	16071,2	1010,2	2089,7	3099,95	7,58	-106,16	106,18	0,02
87,5	0,0583	2100,2	4800,5	7601,2	16063,4	1058,9	2041,1	3099,95	7,62	-91,07	91,08	0,01
88,0	0,0520	2100,2	4800,4	7601,1	16056,5	1101,8	1998,2	3099,96	7,61	-82,44	82,45	0,01
88,5	0,0464	2100,2	4800,4	7601,1	16050,4	1142,0	1958,0	3099,96	7,57	-79,26	79,26	0,00
89,0	0,0413	2100,2	4800,4	7601,0	16044,9	1181,5	1918,5	3099,96	7,51	-79,11	79,11	0,00
89,5	0,0369	2100,2	4800,4	7600,9	16040,0	1221,1	1878,8	3099,96	7,44	-79,30	79,30	0,00
90,0	0,0329	2100,2	4800,4	7600,9	16035,7	1260,5	1839,5	3099,96	7,39	-77,98	77,98	0,00
90,5	0,0294	2100,2	4800,3	7600,8	16031,9	1298,6	1801,3	3099,96	7,35	-74,66	74,67	0,00
91,0	0,0262	2100,2	4800,3	7600,8	16028,4	1334,8	1765,2	3099,96	7,33	-70,29	70,29	0,00
91,5	0,0234	2100,2	4800,3	7600,7	16025,4	1368,9	1731,1	3099,97	7,30	-66,65	66,65	0,00
92,0	0,0209	2100,1	4800,3	7600,7	16022,7	1401,7	1698,2	3099,97	7,25	-65,47	65,47	0,00
92,5	0,0187	2100,1	4800,3	7600,7	16020,2	1434,9	1665,1	3099,97	7,18	-67,44	67,44	0,00
93,0	0,0167	2100,1	4800,2	7600,6	16018,1	1469,7	1630,2	3099,96	7,07	-71,66	71,65	0,00
93,5	0,0149	2100,1	4800,2	7600,6	16016,2	1506,8	1593,2	3099,96	6,96	-75,85	75,84	0,00
94,0	0,0133	2100,1	4800,2	7600,5	16014,4	1545,2	1554,7	3099,96	6,88	-77,22	77,22	0,00
94,5	0,0119	2100,1	4800,2	7600,5	16012,9	1583,0	1516,9	3099,96	6,84	-73,38	73,38	0,01
95,0	0,0107	2100,1	4800,2	7600,5	16011,6	1617,1	1482,8	3099,97	6,89	-62,81	62,83	0,01
95,5	0,0096	2100,1	4800,2	7600,4	16010,3	1643,9	1456,0	3099,98	7,01	-45,02	45,04	0,02
96,0	0,0086	2100,1	4800,2	7600,4	16009,2	1660,0	1440,0	3099,99	7,21	-20,41	20,44	0,03
96,5	0,0077	2100,1	4800,1	7600,4	16008,3	1662,1	1437,9	3100,01	7,47	9,78	-9,75	0,03
97,0	0,0069	2100,1	4800,1	7600,3	16007,4	1648,0	1452,0	3100,02	7,76	43,51	-43,47	0,03
97,5	0,0062	2100,1	4800,1	7600,3	16006,7	1616,8	1483,3	3100,04	8,05	77,90	-77,87	0,03
98,0	0,0055	2100,1	4800,1	7600,3	16006,0	1569,0	1531,1	3100,06	8,33	109,41	-109,38	0,03
98,5	0,0050	2100,1	4800,1	7600,3	16005,4	1507,1	1592,9	3100,07	8,56	134,07	-134,05	0,02
99,0	0,0045	2100,1	4800,1	7600,2	16004,8	1435,8	1664,3	3100,07	8,73	148,05	-148,04	0,01
99,5	0,0040	2100,0	4800,1	7600,2	16004,3	1361,0	1739,1	3100,07	8,82	148,53	-148,53	-0,01
100,0	0,0036	2100,0	4800,1	7600,2	16003,9	1290,0	1810,1	3100,07	8,82	134,69	-134,71	-0,02

Таблиця 3. Показові фрагменти процесів регулювання частоти в енергосистемі за характерними варіантами значень досяжної швидкодії регулятора

Час, с	Δf , Гц	Потужність, МВт							v_e , м/с	Похідна від потужності, МВт/с		
		ГЕС	ТЕС	АЕС	Навантаження	АБ	ВЕС	ВЕС+АБ		ВЕС	АБ	ВЕС+АБ
Варіант 1 $L_{AB} = 6,9\%P_{AB\max}/c$												
75,5	0,00011	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1689,9	1415,2	3105,04	8,94	229,45	-193,20	36,2479
76,0	0,00242	2100,0	4800,0	7600,0	16000,7	1593,3	1550,2	3143,49	9,46	299,65	-193,20	106,4492
76,5	0,01031	2100,0	4800,0	7600,0	16004,2	1496,7	1712,0	3208,63	9,80	337,22	-193,20	144,0201
77,0	0,02521	2100,0	4800,0	7600,0	16012,7	1400,1	1881,9	3281,93	9,96	336,46	-193,20	142,2648
77,5	0,04634	2100,0	4800,0	7600,1	16027,2	1303,5	2042,6	3346,12	9,96	306,11	-193,20	112,9102
78,0	0,07147	2100,0	4800,0	7600,1	16046,9	1206,9	2183,9	3390,78	9,88	262,55	-193,20	69,3524
78,5	0,09785	2100,0	4800,1	7600,2	16070,0	1110,3	2303,6	3413,83	9,80	221,56	-193,20	28,3580
79,0	0,12313	2100,1	4800,1	7600,3	16094,3	1013,7	2405,7	3419,40	9,76	192,32	-193,20	-0,8836
79,5	0,14581	2100,1	4800,2	7600,4	16117,7	917,1	2496,8	3413,90	9,77	175,42	-193,20	-17,7751
80,0	0,16515	2100,1	4800,2	7600,5	16138,9	820,5	2581,4	3401,91	9,80	164,27	-193,20	-28,9277
80,5	0,18080	2100,1	4800,3	7600,7	16157,2	723,9	2659,7	3383,54	9,80	148,59	-193,20	-44,6092
81,0	0,19219	2100,2	4800,3	7600,8	16172,0	627,3	2726,6	3353,83	9,71	119,13	-193,20	-74,0719
81,5	0,19811	2100,2	4800,4	7601,0	16182,5	530,7	2773,9	3304,53	9,52	71,94	-193,20	-121,2645
82,0	0,19646	2100,2	4800,4	7601,1	16187,4	434,1	2793,4	3227,42	9,21	10,47	-193,20	-182,7305
82,5	0,18459	2100,2	4800,5	7601,2	16184,7	337,5	2780,3	3117,82	8,82	-55,70	-193,20	-248,8981
83,0	0,16538	2100,3	4800,5	7601,3	16173,3	364,3	2735,6	3099,94	8,41	-115,20	115,14	-0,0529
Варіант 2 $L_{AB} = 10,3\%P_{AB\max}/c$												
75,5	0,00002	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1685,0	1415,2	3100,12	8,94	229,45	-229,37	0,0809
76,0	0,00005	2100,0	4800,0	7600,0	16000,3	1550,8	1550,2	3101,00	9,46	299,65	-288,40	11,2482
76,5	0,00095	2100,0	4800,0	7600,0	16000,3	1406,6	1712,0	3118,55	9,80	337,22	-288,40	48,8159
77,0	0,00430	2100,0	4800,0	7600,0	16001,7	1262,4	1881,9	3144,24	9,96	336,46	-288,40	48,0556
77,5	0,00982	2100,0	4800,0	7600,0	16005,1	1118,2	2042,6	3160,82	9,96	306,09	-288,40	17,6944
78,0	0,01568	2100,0	4800,0	7600,0	16010,0	974,0	2183,9	3157,88	9,88	262,53	-288,40	-25,8710
78,5	0,01949	2100,0	4800,0	7600,0	16014,7	829,8	2303,5	3133,31	9,80	221,53	-288,40	-66,8739
79,0	0,01928	2100,0	4800,0	7600,1	16017,4	694,4	2405,7	3100,10	9,76	192,28	-192,30	-0,0225
79,5	0,01739	2100,0	4800,0	7600,1	16017,4	603,3	2496,8	3100,09	9,77	175,38	-175,39	-0,0125
80,0	0,01557	2100,0	4800,0	7600,1	16016,3	518,7	2581,3	3100,08	9,80	164,22	-164,23	-0,0116
80,5	0,01389	2100,0	4800,0	7600,1	16014,9	440,5	2659,5	3100,07	9,80	148,53	-148,55	-0,0213
81,0	0,01238	2100,0	4800,0	7600,1	16013,4	373,7	2726,4	3100,06	9,71	119,07	-119,11	-0,0383
81,5	0,01102	2100,0	4800,0	7600,1	16012,0	326,4	2773,7	3100,03	9,52	71,88	-71,93	-0,0555
82,0	0,00981	2100,0	4800,0	7600,1	16010,7	306,9	2793,1	3100,00	9,21	10,42	-10,48	-0,0657
82,5	0,00872	2100,0	4800,0	7600,1	16009,5	319,9	2780,1	3099,97	8,82	-55,74	55,67	-0,0646
83,0	0,00775	2100,0	4800,0	7600,1	16008,4	364,5	2735,4	3099,94	8,41	-115,22	115,17	-0,0529
Варіант 3 $L_{AB} = 12\%P_{AB\max}/c$												
75,5	0,00002	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1685,0	1415,2	3100,12	8,94	229,45	-229,37	0,0809
76,0	0,00004	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1549,9	1550,2	3100,15	9,46	299,65	-299,59	0,0562
76,5	0,00006	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1388,2	1712,0	3100,17	9,80	337,22	-337,20	0,0180
77,0	0,00009	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	1218,3	1881,8	3100,17	9,96	336,45	-336,47	-0,0179
77,5	0,00011	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	1057,5	2042,6	3100,15	9,96	306,09	-306,13	-0,0399
78,0	0,00012	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	916,2	2183,9	3100,13	9,88	262,52	-262,57	-0,0445
78,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	796,6	2303,5	3100,11	9,80	221,52	-221,55	-0,0359
79,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	694,4	2405,7	3100,10	9,76	192,27	-192,29	-0,0225
79,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	603,4	2496,7	3100,09	9,77	175,37	-175,38	-0,0125
80,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	518,8	2581,3	3100,08	9,80	164,21	-164,23	-0,0116
80,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	440,6	2659,5	3100,07	9,80	148,53	-148,55	-0,0213
81,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	373,7	2726,4	3100,06	9,71	119,07	-119,11	-0,0383
81,5	0,00012	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	326,4	2773,7	3100,03	9,52	71,88	-71,93	-0,0555
82,0	0,00011	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	306,9	2793,1	3100,00	9,21	10,42	-10,48	-0,0657
82,5	0,00010	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	319,9	2780,1	3099,97	8,82	-55,74	55,67	-0,0646
83,0	0,00008	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	364,6	2735,4	3099,94	8,41	-115,22	115,17	-0,0529
Варіант 4 $L_{AB} = 714\%P_{AB\max}/c$												
75,5	0,00002	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1685,0	1415,2	3100,12	8,94	229,45	-229,37	0,0809
76,0	0,00004	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1549,9	1550,2	3100,15	9,46	299,65	-299,59	0,0562
76,5	0,00006	2100,0	4800,0	7600,0	16000,0	1388,2	1712,0	3100,17	9,80	337,22	-337,20	0,0180
77,0	0,00009	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	1218,3	1881,8	3100,17	9,96	336,45	-336,47	-0,0179
77,5	0,00011	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	1057,5	2042,6	3100,15	9,96	306,09	-306,13	-0,0399
78,0	0,00012	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	916,2	2183,9	3100,13	9,88	262,52	-262,57	-0,0445
78,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	796,6	2303,5	3100,11	9,80	221,52	-221,55	-0,0359
79,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	694,4	2405,7	3100,10	9,76	192,27	-192,29	-0,0225
79,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	603,4	2496,7	3100,09	9,77	175,37	-175,38	-0,0125
80,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	518,8	2581,3	3100,08	9,80	164,21	-164,23	-0,0116
80,5	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	440,6	2659,5	3100,07	9,80	148,53	-148,55	-0,0213
81,0	0,00013	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	373,7	2726,4	3100,06	9,71	119,07	-119,11	-0,0383
81,5	0,00012	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	326,4	2773,7	3100,03	9,52	71,88	-71,93	-0,0555
82,0	0,00011	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	306,9	2793,1	3100,00	9,21	10,42	-10,48	-0,0657
82,5	0,00010	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	319,9	2780,1	3099,97	8,82	-55,74	55,67	-0,0646
83,0	0,00008	2100,0	4800,0	7600,0	16000,1	364,6	2735,4	3099,94	8,41	-115,22	115,17	-0,0529

Варіант 1. Аналіз табл. 3 показує, що допустиме значення відхилення частоти в наведеній енергосистемі, яке є нормативним для ОЕС України ($|\Delta f|_{\max} \leq 0,2$ Гц), забезпечується вже при обмеженні на швидкодію регулятора $L_{AB} = 6,9\% P_{AB \max} / c$ (точка $t = 81,5$ с). При цьому показник $|dP_{AB}(t)/dt|_{\max} = 193,2$ МВт/с ($t = 75,5-82,5$ с), а похідна від потужності ВЕС $dP_{BEC}/dt = 337,2$ МВт/с ($t = 76,5$ с). Однак сумарна потужність $P_{BEC+AB}(t)$ в інтервалі часу (76,5–82,5) с не задовольняє вимогу з потужності, яку задано диспетчерським управлінням ($U_{\delta} = 3100$ МВт), суттєво його перевищуючи.

Варіант 2. Згідно цього варіанта, швидкодія регулятора $L_{AB} = 10,3\% P_{AB \max} / c$ була визначена таким чином, щоб виконувалась вимога енергосистеми Євросоюзу ENTSO-E щодо допустимого відхилення частоти ($|\Delta f|_{\max} \leq 0,02$ Гц, точка $t = 78,5$ с). У результаті максимальний модуль похідної $dP_{AB}(t)/dt$ був у всьому часовому діапазоні меншим за максимальне значення похідної dP_{BEC}/dt . Його максимальне значення визначалось обмеженням L_{AB} для цього варіанта і становило 288,4 МВт/с у часовому діапазоні $t = (76-78,5)$ с. Модуль максимального відхилення частоти $|\Delta f|_{\max} = 0,0195$ Гц у точці $t = 78,5$ с. Вимога $U_{\delta}(t) = P_{BEC}(t) + P_{AB}(t)$ не виконується у досить вузькому часовому інтервалі $t = (76,5-79)$ с.

Варіант 3. Метою досліджень згідно цього варіанта було встановити ключові показники перехідного процесу за умови, коли обмеження зі швидкодії регулятора співпадає з максимальним значенням похідної $|(dP_{BEC}(t)/dt)|_{\max}$, тобто $L_{AB} = 337,2$ МВт/с, або $L_{AB} = 12\% P_{AB \max} / c$. За такої умови, як видно із табл. 3, максимальне відхилення частоти на всьому часовому інтервалі $|\Delta f|_{\max} \leq 1,3 \cdot 10^{-4}$ Гц; з точністю до четвертого десятичного знака в усіх точках часового діапазону виконується вимога $U(t) = P_{BEC}(t) + P_{AB}(t) = 3100$ МВт; з точністю до четвертого десятичного знака у кожній точці заданого часового інтервалу має місце тотожність

$$\frac{dP_{AB}(t)}{dt} = -\frac{dP_{BEC}(t)}{dt}, \quad (10)$$

яка є наслідком вимоги (9) при $U(t) = \text{const}$. У точці $t = 76,5$ с модуль похідної від потужності $P_{AB}(t)$ досягає значення L_{AB} , тобто, $|(dP_{AB}(t)/dt)| = L_{AB}$.

Варіант 4. Дослідження згідно цього варіанта були проведені для виявлення, яким чином буде проходити в енергосистемі процес регулювання частоти і потужності, якщо швидкодія регулятора буде значно перевищувати значення похідної від потужності $P_{BEC}(t)$. З літературних джерел відомо, що швидкість зростання потужності акумуляторної батареї може досягати значення $7,14 P_{AB \max} / c$ [3], що згідно вихідних умов майже у 60 разів є

більшим, ніж максимальний модуль похідної від потужності $P_{BEC}(t)$.

Порівняння показників варіанта 4 та 3 демонструє їх повне співпадіння. Важливою його особливістю є те, що в жодній точці часового інтервалу модуль похідної $dP_{AB}(t)/dt$ не досягає значення L_{AB} для цього варіанта, сама ця похідна на усьому діапазоні задовольняє рівняння (10), а її максимальний модуль дорівнює 337,2 МВт/с.

Аналіз результатів і висновки. Для аналізу результатів дослідження необхідно ввести новий показник, а саме, відношення максимального модуля похідної від потужності регулятора до максимального модуля похідної від потужності вітрової електростанції

$$R = \frac{|dP_{AB}(t)/dt|_{\max}}{|dP_{BEC}(t)|_{\max}}, \quad t = \overline{t_0, T}, \quad (11)$$

де t_0, T – початковий і кінцевий момент регулювання відповідно.

Важливим є те, що максимуми значень похідних у залежності (11) можуть спостерігатись як одночасно, так і в різні моменти часу визначеного діапазону.

У табл. 4 наведено параметри і показники чотирьох варіантів системи регулювання, які найбільшою мірою визначають якість регулювання частоти і потужності в енергосистемі з вітовими електростанціями. Якість регулювання визначається величиною модуля відхилення частоти $|\Delta f|_{\max}$ та модулем відхилення уставки диспетчерського центру $U_{\delta}(t)$ від суми потужностей вітрової електростанції та регулятора на всьому часовому діапазоні

$$\Delta U_{\delta} = |U_{\delta}(t) - P_S(t)|_{\max},$$

$$P_S(t) = P_{BEC}(t) + P_{AB}(t), \quad t = \overline{t_0, T}. \quad (12)$$

Із табл. 4 видно, що ці ключові показники однозначно і разуче залежать від параметра R . Зі зростанням цього параметра, зокрема, від 0,57 до 0,86 модуль відхилення частоти зменшується на порядок, а нев'язка диспетчерської уставки ΔU_{δ} – майже у 7 разів. Характерною особливістю показника R є те, що він не може перевищувати одиницю ($R \leq 1$). У випадку, коли $L_{AB} = |dP_{BEC}(t)/dt|_{\max}$, модуль похідної регулятора $|dP_{AB}(t)/dt|_{\max}$ виходить на зазначене обмеження L_{AB} , при цьому досягається рівність $R = 1$ (варіант 3). У системі в усіх точках часового інтервалу виконується рівність (10), відхилення частоти Δf та нев'язка диспетчерської уставки перетворюються практично у нулі, в системі спостерігається ідеальний режим.

Подальше підвищення швидкодії регулятора ($L_{AB} > |dP_{BEC}(t)/dt|_{\max}$), як видно із результатів варіанта 4, практично не надає ні покращення,

Таблиця 4. Основні параметри і показники, що визначають характер і якість регулювання частоти в енергосистемі

Варіант	L_{AB}	$\frac{\%P_{AB,max}/c}{\text{МВт/с}}$	$\left \frac{dP_{AB}(t)}{dt} \right _{\max}$, МВт/с	R	$ \Delta f _{\max}$, Гц	ΔU_{δ} , $\frac{\text{МВт}}{\%}$
1		$\frac{6,9}{193,2}$	193,2	0,57	0,2	$\frac{319,4}{10,3}$
2		$\frac{10,3}{288,4}$	288,4	0,86	0,02	$\frac{60,8}{1,9}$
3		$\frac{12}{337,2}$	337,2	1	$1 \cdot 10^{-4}$	$\frac{0,2}{0}$
4		$\frac{714}{19,99 \cdot 10^3}$	337,2	1	$1 \cdot 10^{-4}$	$\frac{0,2}{0}$

ні погіршення режиму регулювання, а показник $R = 1$ в усіх точках часового діапазону. Це явище зумовлене наступними чинниками. Модель (1) – (9) формалізує систему автоматичного регулювання частоти і потужності в енергосистемі, у якій діє дестабілізуючий об'єкт, яким є вітрова електростанція. У моделі діє регулююча функція (9), яка забезпечує в системі негативний зворотній зв'язок як по частоті ($|\Delta f|_{\max} \rightarrow 0$), так і уставці диспетчерського центру ($\Delta U_{\delta} \rightarrow 0$). Після досягнення рівності (10) подальше зростання $\left| \frac{dP_{AB}(t)}{dt} \right|_{\max}$ є неможливим, оскільки в такому випадку наступить перерегулювання, порушиться баланс (1), і зворотній зв'язок автоматично зменшить модуль похідної $\frac{dP_{AB}(t)}{dt}$. У зв'язку із установами такого явища при конфігуруванні структури системи стабілізації частоти і потужності в енергосистемах із потужними ВЕС швидкодію регулятора доцільно вибирати такою, щоб вона забезпечувала рівність (10). Перевищення швидкодії регулятора додаткових технологічних переваг не надає, однак погіршує при цьому економічні показники.

Особливої уваги потребує ситуація із забезпеченням точності диспетчерської уставки U_{δ} . Згідно даних табл. 3, 4 необхідна точність по частоті за вимогами ОЕС України та ENTSO-E задовольняється вже при значеннях параметра R , що дорівнюють 0,57 та 0,86 відповідно (варіанти 1, 2).

Однак при цьому нев'язка ΔU_{δ} перевищує диспетчерську уставку на 10,3 та 1,9%, що може призвести до перевищення уставок по напрузі у вузлах приєднання ВЕС до мережі енергосистеми.

Тому при конфігуруванні системи стабілізації частоти і потужності потрібно враховувати виконання вимог щодо відхилення як по частоті, так і по потужності. Як показують наведені дослідження, зазначені вимоги одночасно гарантовано виконуються при значенні параметра R , який дорівнює одиниці.

1. Кулик М.М., Дрьомін І.В., Згуровець О.В. Дослідження режимів роботи об'єднаних енергосистем з потужними вітровими електростанціями та акумуляторними батареями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 2(53). С. 15—20. <https://doi.org/10.15407/pge2018.02.015>
2. Кулик М.М., Згуровець О.В. Адаптивна модель регулювання частоти в енергосистемах з вітровими електростанціями. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 4(55). С. 5—10. <https://doi.org/10.15407/pge2018.04.005>
3. Батарея Tesla стабилизировала энергосеть Австралии, когда отказала угольная ТЭС. URL:https://elektrovesti.net/58153_batareya-tesla-stabilizirovala-energiset-avstralii-kogda-otkazala-ugolnaya-tes (дата звернення: 01.08.2018).

Надійшла до редколегії: 09.01.2020