

Современные средства регулирования перетоков мощности и эффективность применения их в энергосистемах.

д.х.т.н. чл-корр. АНРМ Постолатий В.М, д.т.н. Калинин Л.П.,
д.т.н. Зайцев Д.А., д.т.н. Быкова Е.В.

Институт энергетики Академии Наук Республики Молдова, Кишинев

Реферат.

Эффективность работы и успешное развитие электроэнергетических систем связаны, прежде всего, с возможностями осуществления на практике заданных пропускных способностей внутрисистемных и межсистемных электропередач и управления потоками мощности в отдельных ветвях и контурах.

Строительство новых линий электропередач и ввод источников электроэнергии не всегда обеспечивают желаемые результаты и показатели энергосистем, если не предусматривать соответствующие средства регулирования потокораспределения активной и реактивной мощности в сложносвязанных электрических сетях. На примере энергообъединения региона Молдовы, при рассмотрении вариантов строительства новых источников мощности и перспектив развития межсистемных связей с энергосистемами Румынии и Украины выявлено, в частности, что

1. Введение.

В настоящей работе приведены результаты исследований режимов электроэнергетической системы Республики Молдова при параллельной работе с энергосистемами Украины, России и других стран СНГ, а также Румынии, Болгарии, Польши, Словакии, Венгрии и Восточной Германии.

В качестве расчетной модели принята схема, имевшая место в 90-ые годы, когда энергосистемы работали параллельно. В последующие годы, как известно, произошло разделение энергосистем. Энергосистемы Румынии, Болгарии, Венгрии, Польши, Германии присоединены на параллельную работу к энергосистемам стран Западной Европы. Энергосистемы Молдовы и Украины восстановили режим параллельной работы с энергосистемами стран СНГ. Вместе с тем, проблема соединения энергосистем на уровне «Восток-Запад» остается актуальной, и в данном направлении сторонами предпринимаются определенные усилия по подготовке к осуществлению так называемой большой синхронизации объединений энергосистем Востока и Запада. В рамках рассматриваемых проблем изучение вопросов

предусматриваемая новая ВЛ-400 кВ Бельцы (Молдова) – Сучава (Румыния) в случае параллельной синхронной работы энергосистем Молдовы, Украины (и соответственно, России и стран СНГ), а также Румынии недостаточно загружается, что ослабляет эффективность данной электропередачи.

Применение специальных средств фазового регулирования позволяет устранить этот недостаток и обеспечить управление потоками мощности в желаемых пределах.

Как показали исследования, подобные ситуации имеют место и в других энергосистемах и регионах. Именно этим обусловлена целесообразность исследований и разработок средств регулирования потоков мощности, что и является содержанием настоящей работы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, управляемая электропередача, фазорегулирующее устройство, параметрический регулятор мощности.

о совместной работе энергосистемы Молдовы с энергосистемами соседних стран хотя и носит региональный характер, однако увязывается с общим направлением перспективного развития объединенной энергосистемы страны Европы и Азии.

Целесообразность и необходимость анализа состояния высоковольтных электропередач, их режимов работы и перспектив развития обусловлены целым рядом факторов, основными из которых являются:

- интересы Молдовы и соседних стран в повышении надежности электроснабжения в нормальных и аварийных режимах;
- потребности Молдовы и Румынии в импорте электроэнергии;
- возможности энергосистем России и Украины в осуществлении экспорта электроэнергии через энергосистему Молдовы в другие страны;
- общие направления стратегии развития электроэнергетического объединения стран Черноморского экономического сотрудничества.

В настоящей работе рассмотрена схема и режимы параллельной синхронной работы энергосистем упомянутых выше стран с учетом перспектив роста электропотребления в Республике Молдова и некоторых основных направлений развития объединенной энергосистемы региона.

Выполненные расчеты и проведенный анализ показали, что для обеспечения планируемых перетоков мощности по отдельным высоковольтным связям и достижения заданных показателей режимов в энергосистеме региона необходимо не только сооружение ряда новых электропередач, но и применение соответствующих средств управления потоками мощности. В качестве таковых в данной работе рассмотрены средства, основанные на использовании фазорегулирующих устройств (ФРТ), в том числе в сочетании с другими аппаратами, названными в зависимости от комплектности – параметрическими устройствами регулирования потоков мощности, а также Interphase Power Controller (IPC).

Исследования и разработки данных средств являются частью общего нового научного направления, сформировавшегося в последние годы в области управления режимами энергосистем и, в частности, создания гибких систем передачи энергии FACTS (Flexible Alternative current Transmission System). В сочетании с применением управляемых линий электропередач повышенной пропускной способности подобные электропередачи приобретают новые свойства и названы Controlled Flexible Alternative Current Transmission System (CFACS). На примере конкретной электропередачи одного из вариантов схемы энергосистемы региона показана целесообразность и эффективность применения новых средств регулирования потоками мощности и методические подходы по их выбору и обоснованию.

2. Анализ исходной схемы объединенной энергосистемы и возможных направлений ее развития

В качестве исходной расчетной схемы принята электроэнергетическая система, объединяющая на параллельную синхронную работу системы восьми стран: Молдовы, Украины (включая эквивалент Европейской части России, а также Белоруссии), Румынии, Болгарии, Венгрии, Чехословакии, Польши и Германии.

Электроэнергетическая система Молдовы включает в свой состав ВЛ-330, 400 кВ (см.фрагмент схемы). Шестью

межсистемными высоковольтными линиями электропередачи напряжением 330 кВ энергосистема Молдовы соединена непосредственно энергосистемой Украины, а с помощью ВЛ-400 кВ с энергосистемой Болгарии. Связь с энергосистемой Румынии осуществляется по 3-ем ВЛ-110 кВ, однако в расчетной схеме они не показаны.

Украина, в свою очередь, по ВЛ-750 кВ Южно Украинская АЭС – Исакча – Варна соединена с энергосистемами Румынии и Болгарии. В расчетной схеме она представлена как действующая. В дальнейшем при выполнении вариантных расчетов рассмотрены схемы и при отключении данной ВЛ-750 кВ.

По ВЛ-750 кВ Винница-Альбертирша в расчетной схеме обеспечивается связь с энергосистемой Венгрии. По ряду ВЛ-400 кВ осуществляется связь энергосистем Венгрии, Чехословакии, Польши и Германии. В исходной расчетной схеме учитывается также и ВЛ-400 кВ Молдавская ГРЭС Вулканешты – Добруджа. В дальнейшем в других расчетных вариантах рассмотрены схемы с заходом данной ВЛ на подстанцию 400 кВ в Румынии и, по существу, создание на базе участка данной ВЛ Вулканешты – Добруджа двух самостоятельных ВЛ: ВЛ-400 кВ Вулканешты – Исакча и ВЛ-400 кВ Исакча – Варна.

В расчетных вариантах перспективного развития межсистемных связей для решения задач вхождения энергосистемы Молдовы в международный энергетический рынок и формирования объединенной энергосистемы в схемах рассмотрена энергосистема с новыми ВЛ-330 кВ (развитие внутренних сетей и межсистемных связей с Украиной), ВЛ-400 кВ для связи с энергосистемой Румынии, в том числе и при возможном развитии некоторых ВЛ-400 кВ, отходящих от примыкающих к Молдавской энергосистеме узлов.

Вариант перспективного развития межсистемных связей системы показан на схеме пунктиром. Кроме того, рассмотрены варианты усиления существующих электрических сетей на территории Республики Молдова путем сооружения новых ВЛ-330 кВ между узлами Бельцы – Страшены и Кишинев – Рыбница.

С учетом намечаемого в перспективе развития энергосистемы Украины в расчетных схемах в настоящей работе сделана попытка рассмотрения с точки зрения интересов и Молдовы и Украины введения в энергосистеме Украины некоторых новых ВЛ-330 кВ. В частности, речь идет о возможном усилении связей, отходящих от узла 330 кВ Котовск (Украинский), а именно: о строительстве новой ВЛ – 330 кВ Котовск – ЮУАЭС; от узла Днестровской ГЭС введение ВЛ – 330 кВ ДнГЭС - Бар, а также о строительстве второй цепи ВЛ-330 кВ Аджалык – Усатово.

Исходные данные по генерирующим источникам Молдавской энергосистемы (исходный, базовый вариант)

Таблица 1

Узел	Название	Уном, кВ	Р ген, МВт	Q ген, МВар
601	МГРЭС-330	330	1328	440,2
603	МГРЭС-110	121	320	86,2
632	Ст.35-4АТ (МГРЭС)	37,5	28	12
635	Бл.12 (МГРЭС)	16,5	210	105
622	БТЭЦ	118	24	7
623	КоГЭС	112	16	7
628	ДГЭС	118	24	7
605	КТЭЦ-1	124	46	5
602	КТЭЦ-2	123	240	122,8
<i>Итого</i>			2236	789,8

Перечень ветвей и узлов для анализа режимов энергосистем

Таблица 2

Название	№ узлов	Название	№ узлов
ДнГЭС-Бельцы-330	805-611	Бакэу Суд-Гутинашь-400	1282-1234
Бельцы-Страшены-330	611-621	Гутинашь-Исакча-400	1234-1298
Страшены-Кишинев-330	621-604	Исакча-ЮУАЭС-750	1299-599
Кишинев-МГРЭС-330	604-601	Сучава-Рошиорь-400	1280-1206
МГРЭС-Вулканешты-400	615-617	Вулканешть-Исакча-400	617-1298
Вулканешты-Добруджа-400	617-1106	Аджалык-Усатово-330	523-508
Бельцы-Сучава-400	666-1280	Рыбница-Котовск-330	624-530
Сучава-Роман-400	1280-1281	Котовск-Лад.ГРЭС-330	530-801
Роман-Бакэу Суд-400	1281-1282	Сучава – Гэдэлин-400	1280 – 1256
Дн.ГЭС-Бар-330	805-818	Страшены-Яшь-330	621-668

3. Результаты расчета и анализа параметров режима работы исходного (базового) варианта схемы объединенной электроэнергетической системы

На базе приведенных выше исходных данных, а также других необходимых данных параметров элементов электроэнергетических систем Молдовы, Украины, Румынии, Болгарии, Венгрии, Чехословакии, Польши и Германии были выполнены расчеты установившегося режима объединенной электроэнергетической системы при параллельной работе энергосистем указанных стран.

При принятых расчетных условиях в исходном варианте энергосистемы Молдовы,

Генерируемая расчетная суммарная мощность Молдавской энергосистемы принята равной 2236 МВт. Загрузка отдельных источников приведена в таблице 1, что имело место в 90-годы и ожидается в перспективе.

Для анализа параметров режима объединенной энергосистемы был выбран перечень наиболее представительных узлов и ветвей напряжением 330, 400 и 750 кВ (таблица 2).

Румынии и Украины балансируются по активной мощности. Дефицитной по активной мощности является энергосистема Болгарии. Для энергосистемы Болгарии в конечном счете баланс активной мощности при принятых расчетных условиях обеспечивается за счет импорта электроэнергии из энергосистемы Украины по ВЛ-750 кВ Южно-Украинская АЭС – Исакча – Варна. Украина также осуществляет экспорт мощности в энергосистемы Венгрии и Польши. Загрузка межсистемных высоковольтных линий 330, 400, 750 кВ в объединенной энергосистеме имеет различные значения. В Молдавской энергосистеме и примыкающих межсистемных связях с соседними

энергосистемами в исходной схеме наиболее загруженными являются ВЛ-330 кВ:

- Бельцы – Днестровская ГЭС (277 МВт);
- Страшены – Кишинев (178 МВт);
- Молдавская ГРЭС – Кишинев (2x235 МВт);
- Молдавская ГРЭС – Вулканешты (278 МВт).

В Украинской энергосистеме загруженными являются :

- ВЛ-330 кВ Котовск – Ладыженская ГРЭС (291 МВт);
- ВЛ-330 кВ Молдавская ГРЭС – Котовск (170 МВт).

По ВЛ-750 кВ Южно-Украинская АЭС – Исакча осуществлялся экспорт электроэнергии в энергосистему Болгарии (510 МВт).

Суммарные потери мощности по объединенной энергосистеме в исходной схеме составили 424 МВт, при общей генерации 263373 МВт. Суммарная генерация реактивной мощности составила 112117 МВар, а ее потери – 4445 МВар.

В энергосистеме Молдовы общие показатели в исходной схеме (базовый вариант) были следующими:

- Генерация активной мощности: 2279 МВт;
- Генерация реактивной мощности: 1082 МВар;
- Мощность активной нагрузки: 2246,8 МВт;
- Мощность реактивной нагрузки: 1242 МВар;
- Потери активной мощности: 37,8 МВт (или 1,68 % от общей нагрузки);
- Потери реактивной мощности: -347 МВар.

Далее в работе рассмотрен ряд вариантов развития объединенной энергосистемы. Для анализа оказалось целесообразным из большого количества возможных вариантов выделить два из них:

Вариант 1, в котором дополнительно к существующим линиям электропередачи 330, 400, 750 кВ вводится одна новая ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава, с установкой автотрансформатора связи на подстанции Бельцы 330/400 кВ. В остальном схема остается без изменений.

Вариант 2, отличающийся от варианта 1 тем, что в схеме введено дополнительно еще 13 ВЛ напряжением 330, 400 кВ (см. фрагмент схемы), обеспечивающих усиление собственных высоковольтных сетей Молдовы, а также развитие дополнительных межсистемных связей с энергосистемами Украины и Румынии.

В работе исследованы и другие варианты решения развития межсистемных связей рассматриваемого объединения энергосистем, а именно:

Вариант 3: Схема соответствует варианту 2, но отличие состоит в том, что ВЛ-750 кВ Южно-Украинская АЭС - Исакча отключена.

Вариант 4: Схема соответствует варианту 3, но отличие состоит в том, что суммарная генерация мощности электростанций энергосистемы Молдовы снижена до 1000 МВт (т.е. более, чем на 50% от исходной величины, принятой в базисном и всех предыдущих вариантах).

Вариант 5: характеризуется тем, что, в отличие от варианта 4, в Молдавской энергосистеме погашены все источники электрической мощности, а величина нагрузки, оставленная без изменений, покрывается полностью за счет импорта электроэнергии из соседних стран.

Вариант 6: Характеризуется схемой, указанной в варианте 3, и теми же расчетными условиями. Отличие состоит в изменении участия источников в покрытии баланса мощности. В узле Бельцы предусматривается ввод новой мощности 450 МВт, в узле Кишинев- 120 МВт и в узле Вулканешты-450 МВт. Соответственно на эту величину мощности разгружается Молдавская ГРЭС.

4.Расчет варианта 1 схемы объединенной энергосистемы с добавлением одной ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава и автотрансформатора 330/400 кВ, установленного на подстанции Бельцы

Вариант 1 схемы объединенной электроэнергетической системы отличается от исходного (базового) варианта тем, что к существующим линиям электропередачи дополнительно включена новая ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава. Присоединение ВЛ-400 кВ к шинам подстанции 330 кВ Бельцы осуществлено с помощью автотрансформатора 330/400 кВ.

Параметры ВЛ - 400 кВ Бельцы - Сучава и автотрансформатора 330/400 кВ, установленного на подстанции 330 кВ Бельцы, приведены в таблице 3. В качестве аналога принята конструкция ЛЭП 400 кВ, применяемая в энергосистеме Румынии.

Узлы	Файл	Дли-на, км	Назва-ние ЛЭП	R_0 , Ом / км	X_0 , Ом / км	B_0 , См/км	$R_{л, Ом}$	$X_{л, Ом}$	$B_{л, См}$	Z_B , Ом	$P_{нат, МВт}$
1280-666	ARIS10V2 ME+ROM-V2	128	Сучава-Бельцы	0,032	0,308	-3,22	4,09	39,4	-412	309	517
611-666			АТ-330/400 кВ	0,1	10	$k_r=0,825$					

Волновое сопротивление и натуральная мощность ВЛ – 400 кВ рассчитаны на основе указанных данных по формулам:

$$Z_B = (x_0/b_0)^{0,5} = (0,308/(3,22 \cdot 10^{-6}))^{0,5} = 309 \text{ Ом};$$

$$P_{нат} = U^2 / Z_B = 517,79 \text{ МВт}.$$

Аналогично тому, как для исходного варианта, для варианта 1 схемы объединенной энергосистемы был выполнен расчет установившегося нормального режима энергосистемы. Различие состоит в измененных параметрах расчетной схемы, что обусловлено включением в сеть новой ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава с установкой автотрансформатора 330/400 кВ на подстанции 330 кВ Бельцы.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что режим объединенной энергосистемы в целом существенно не изменился. Заметно изменились только перетоки мощности в узле Бельцы.

Новая ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава загрузилась, однако, незначительно. Переток мощности по ней составил: $P = -76,5$ МВт и $Q = j83,6$ МВар, т.е. из узла Бельцы через установленный автотрансформатор АТ-330/400 кВ протекает активная мощность от подстанции Бельцы (Молдова) к подстанции Сучава (Румыния), а реактивная мощность – наоборот, стекает с данной ВЛ в узел подстанции Бельцы. Это объясняется тем, что ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава генерирует реактивную мощность, величина которой превышает ее потери в линии, так как загрузка по активной мощности (83,6 МВт) меньше значения натуральной мощности данной ВЛ составляющего 517 МВт.

В данном варианте увеличился переток активной мощности из энергосистемы Украины по ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Бельцы с величины $P = 277$ МВт до $P = 315$ МВт, а переток реактивной мощности уменьшился от величины $Q = j107$ МВар до значения $Q = j72$ МВар.

Произошло перераспределение баланса мощности в узле Сучава в энергосистеме Румынии. Уменьшился переток мощности по ВЛ-400 кВ от подстанции Роман 400 кВ до подстанции Сучава, а также от подстанции Бакэу Суд 400 кВ до подстанции Роман и от подстанции Гутинаш до подстанции Бакэу Суд. Это объясняется тем, что ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава взяла на себя часть нагрузок узлов Сучава, Роман и Бакэу Суд.

Вопрос о строительстве ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава требует своего дальнейшего технико-экономического обоснования. Загрузка на уровне 76 МВт является недостаточной для эффективной работы данной ВЛ-400 кВ, обладающей величиной натуральной мощности более 500 МВт.

5. Расчет варианта 2 по полной схеме, с добавлением к варианту 1 ряда новых ВЛ-330, 400 кВ в Молдавской энергосистеме и частично в энергосистемах Украины и Румынии

В варианте 2 схемы объединенной энергосистемы восьми стран (Молдовы, Украины, Румынии, Болгарии, Венгрии, Чехословакии, Польши, Германии) предусматривается усиление межсистемных высоковольтных связей между энергосистемами Молдовы и Украины, Молдовы и Румынии, Молдовы – Болгарии, а также развитие внутрисистемных ВЛ-330 кВ в энергосистеме Молдовы и ВЛ-400 кВ в энергосистеме Румынии.

Перечень новых линий электропередачи и автотрансформаторов приведен в таблице 4, а их включение – выше на схеме. В схеме сохранена ВЛ-400 кВ Бельцы – Сучава и АТ-330/400 кВ на подстанции Бельцы, как и в варианте 1. Рассмотрено дальнейшее развитие связи с энергосистемой Румынии путем введения ВЛ-330 кВ Страшены – Яшь с установкой на подстанции Яшь автотрансформатора связи

330/220 кВ, так как на подстанции Яшь напряжение 220 кВ.

Кроме этих линий электропередачи рассмотрено также введение новой ВЛ-400 кВ Сучава – Рошиорь или ВЛ-400 кВ Сучава – Гэдэлин. Целесообразность введения одной

Перечень новых ЛЭП-330, 400 кВ в расчетном варианте 2

Наименование
ВЛ-400 Сучава – Бельцы
Автотрансформатор 330/400 кВ, на п/ст Бельцы
ВЛ-400 кВ Страшены – Яссы
Автотрансформатор 330/220 кВ, на п/ст Яссы
ВЛ-400 Сучава – Рошиорь
ВЛ-400* Вулканешты – Исакча
ВЛ-400* Исакча – Добруджа
ВЛ-330 Бельцы – Дн.ГЭС
ВЛ-330 Бельцы – Страшены

*) При отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС – Добруджа.

***) Данные линии в схему не вводились; ВЛ-750 кВ ЮУАЭС – Исакча – Варна оставлена в работе.

В Южной части энергосистем Молдовы и Румынии в схеме варианта 2 предусмотрен заход существующей ВЛ-400 кВ Вулканешты – Добруджа на подстанцию 400 кВ Исакча, т.е. создание на базе ВЛ-400 кВ Вулканешты – Добруджа двух новых ВЛ-400 кВ: Вулканешты – Исакча и Исакча – Добруджа. Целесообразность такого решения обусловлена возможностью при малых затратах решить важную задачу - усиления межсистемных связей энергосистем Молдовы и Румынии, без ущерба связи с энергосистемой Болгарии.

В энергосистеме Украины в схеме варианта 2 предусматривается введение 3-ех новых ВЛ-330 кВ:

- ВЛ-330 кВ Днестровская ГЭС – Бар;
- ВЛ-330 кВ Котовск – Южно-Украинская АЭС;
- Второй цепи ВЛ-330 кВ Аджалык – Усатово.

Величины загрузки новых ВЛ-330, 400 кВ, предусмотренных в вариантах 1 и 2 схемы объединенной энергосистемы, (МВА)

Таблица 5

Узлы		Наименование	Загрузка ВЛ, МВА		
i	j		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
666	1280	ВЛ-400 Бельцы - Сучава	-76,5+j83,6	-131,5-j310,8	-145,8-j311
611	666	Автотрансформатор 330/400 кВ, на п/ст Бельцы			
621	668	ВЛ-400 кВ Страшены – Яссы		-62,6+j172	-99,8+j119
668	1269	Автотрансформатор 330/220 кВ, на п/ст Яссы			
1280	1206	ВЛ-400 Сучава – Рошиорь		-	-
617	1298	ВЛ-400* Вулканешты – Исакча		-68,5+j88	-306-j18
1298	1106	ВЛ-400* Исакча – Добруджа		-91,6+j104	-107+j116
611	805	ВЛ-330 Бельцы – Дн.ГЭС		189+j102	227+j99
611	621	ВЛ-330 Бельцы – Страшены		-24+j83	-60+j83
604	621	ВЛ-330 Страшены – Кишинев		-148+j31	-112+j3
508	523	ВЛ-330 Усатово - Аджалык		-17,9+j48	31+j40
530	520	ВЛ-330 Котовск – ЮУАЭС		147+j61	190+j55
611	624	ВЛ-330 Бельцы – Рыбница		28,4+j102,6	30,7+j106
621	629	ВЛ-330 Страшены – Рыбница		22,8+j42	56,6+j45

из этих линий может быть обусловлена перспективами возможного развития энергосистемы Румынии в северной ее части, а также целями развития объединения энергосистем Восток – Запад.

Таблица 4

Наименование
ВЛ-330 Страшены – Кишинев
ВЛ-330 Аджалык – Усатово
ВЛ-330 Котовск – ЮУАЭС
ВЛ-330 Бельцы – Рыбница
ВЛ-330 Страшены – Рыбница
ВЛ-330 Дн.ГЭС – Бар
ВЛ-400 Сучава – Гэдэлин
МГРЭС – Вулканешты ВЛ-400 (в габаритах 750 кВ)**
Вулканешты - Исакча ВЛ-400 кВ (в габаритах 750 кВ)**

Введение этих линий целесообразно исходя из необходимости улучшения параметров режимов энергосистем, и особенно для обеспечения нормальной работы при аварийных отключениях других ВЛ-330 кВ.

Собственно в энергосистеме Молдовы рассмотрены включения вторых цепей 330 кВ между подстанциями Бельцы – Дн. ГЭС, Бельцы – Страшены, Страшены – Кишинев, а также ВЛ-330 Бельцы – Рыбница, Страшены – Рыбница. Данные по загрузке внутрисистемных и межсистемных высоковольтных связей 330, 400 кВ по результатам расчета приведены в таблице 5.

В результате введения новых электропередач произошло изменение перетоков активной и реактивной мощностей в основном между энергосистемами Украины, Молдовы, Румынии.

805	818	ВЛ-330 ДН.ГЭС – Бар		-82+j30	-73+j30
1280	1256	ВЛ-400 Сучава – Гэдэлин		-4,1+j204	0,3+j210
615	617	МГРЭС – Вулканешты ВЛ-400 (в габ. 750 кВ)**			
617	1298	Вулканешты – Исакча ВЛ-400 кВ (в габ. 750 кВ)**			

*) При отключении ВЛ-400 кВ МГРЭС - Добруджа

Продолжение таблицы 5

Узлы		Наименование	Вариант 4	Вариант 5	Вариант 6
I	j				
666	1280	ВЛ-400 Бельцы - Сучава	-116-j293	-81,3-j230,9	-184,8-j344,6
611	666	Автотрансформатор 330/400 кВ, на п/ст Бельцы			
621	668	ВЛ-400 кВ Страшены – Яссы	-32+j136,3	26,8+j207	-92,6+j118,4
668	1269	Автотрансформатор 330/220 кВ, на п/ст Яссы			
1280	1206	ВЛ-400 Сучава – Рошиорь	-	-	-
617	1298	ВЛ-400* Вулканешты – Исакча	220,3-j12,8	732,7+j241,1	-156,4+j22,9
1298	1106	ВЛ-400* Исакча – Добруджа	-59,1+j119	-9,2+j156,5	-109,2+j117,9
611	805	ВЛ-330 Бельцы – Дн.ГЭС	305,8+j100	361+j200	203,4+j77,3
611	621	ВЛ-330 Бельцы – Страшены	-122,1+j71,5	-165,5+j15,7	-138,1+j50,7
604	621	ВЛ-330 Страшены – Кишинев	28+j37,1	94,6+j115,4	28+j39,5
508	523	ВЛ-330 Усатово - Аджалык	177,6+j36,5	263,8+j80,7	78,8+j34,1
530	520	ВЛ-330 Котовск – ЮУАЭС	267,5+j54,5	334-j145,8	176,6+j53,4
611	624	ВЛ-330 Бельцы – Рыбница	13,4+j93,8	10,2+j52,7	-38,7+j81,1
621	629	ВЛ-330 Страшены – Рыбница	91,1+j39,5	122,4+j65,2	49,8+j45,4
805	818	ВЛ-330 ДН.ГЭС – Бар	-59,9+j31,4	-42,9+j29,5	-85,2+j25,4
1280	1256	ВЛ-400 Сучава – Гэдэлин	43,9+j213,7	85,1+j245,1	-11,6+j204,1
615	617	МГРЭС – Вулканешты ВЛ-400 (в габ. 750 кВ)**			-35,6-j1
617	1298	Вулканешты – Исакча ВЛ-400 кВ (в габ. 750 кВ)**			-167,4+j18,8

6. Анализ режимов ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава и способы регулирования перетоков мощности

Из приведенных выше результатов (см. табл. 4) следует, что ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава в самых различных режимах и вариантах развития сетей и генерирующих источников грузится слабо. В Варианте 1 схемы системообразующих ВЛ 330,400 кВ переток активной мощности по ВЛ 400 кВ Бельцы-Сучава не превышает 76,5 МВт. При полном развитии межсистемных связей и введении в узле Бельцы новой электростанции мощностью 450 МВт и развитии сети 400 кВ от подстанции 400 кВ Сучава (Румыния) максимальный переток мощности по ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава достигает 184 МВт, что, однако, ниже проектной ее пропускной способности. Желательный переток мощности по данной линии должен быть, по крайней мере, не ниже величины мощности намечаемой к строительству новой электростанции в узле Бельцы. Как уже было указано выше, величина натуральной мощности рассматриваемой трехфазной ВЛ-400 кВ Бельцы - Сучава составляет 517 МВт, что указывает на возможности осуществления передачи по ней мощности значительно большей, чем реально полученная в расчете

(при свободном распределении потоков мощности в системе).

Следовательно, при этих условиях вводимая ЛЭП-400 кВ будет использована неэффективно. Такое положение обусловлено тем, что эквивалентное сопротивление участка сети $X_{ЭС}$, относительно узловых точек присоединения, значительно меньше собственного сопротивления этой линии $X_{Л}$. Шунтирующее влияние сопротивления $X_{ЭС}$ препятствует полному использованию технических возможностей вводимой линии. Режим свободного распределения нагрузки представлен на рис.1.

Рациональное использование ЛЭП-400 кВ может быть обеспечено при применении новых средств управления потоками мощности, основанных на использовании идеи фазового поворота вектора выходного напряжения устройства по отношению к входному. В нашем случае выходным является узел 330 кВ, а входным – начало ВЛ-400 кВ. Установка такого устройства позволяет принудительно ввести то или иное значение угла сдвига вектора напряжения передающей системы по отношению к приемной и, таким образом, при наличии замкнутых контуров обеспечить желаемое изменение потоков мощности, транспортируемой по электропередаче Бельцы-Сучава, являющейся одной из ветвей

сложнозамкнутой объединенной энергосистемы.

Наиболее ярко выраженным с участием этой ветви является контур, образованный ВЛ-330,400 кВ, соединяющими узлы: Бельцы, Сучава, Роман, Гутинаш, Смырдан, Исакча, Вулканешты, МГРЭС, Кишинев, Страшены, Бельцы.

В Институте энергетики АН Молдовы, а также в ряде других организаций на протяжении продолжительного времени ведутся исследования средств фазового управления для регулирования параметров электропередач повышенной пропускной способности [1,2], а также для оптимизации режимов энергосистем.

К настоящему времени в мировой практике доказана эффективность применения в энергосистемах фазорегулирующих устройств и созданных на их базе различных других параметрических систем регулирования мощности. В качестве перспективных следует рассматривать устройства типа УПКФРТ и ИРС. Вариант ИРС показан на рис.2. и соответствует условию $|B_1| = |B_2|$. В этом случае устройство обладает свойствами источника неизменного тока, а регулирование осуществляется с помощью ФРТ.

В зависимости от соотношения между собственными значениями проводимостей B_1 и B_2 могут быть получены другие модификации устройства, принципиально отличающиеся по своим свойствам от классического варианта. В частности, при шунтировании проводимости B_1 устройство преобразуется в управляемую с помощью ФРТ продольную компенсацию УПКФРТ. При шунтировании проводимости B_1 и отключении B_2 устройство становится чистым фазорегулятором ФРТ. Таким образом, управляемая электрическая связь на базе ИРС может выступать в различных качествах. При этом во всех указанных модификациях агрегат обеспечивает принудительное регулирование потоков активной мощности между узлами транспортной сети за счет изменения угла δ_{sr} между входным (U_s) и выходным (U_r) напряжениями. Режим принудительного

распределения нагрузки схематически показан на рис.3. Представленные далее расчеты потокораспределения на участке транспортной сети, соответствуют трем указанным модификациям устройства:

- ИРС в режиме фазорегулирующего трансформатора (ФРТ);

- ИРС в режиме управляемой продольной компенсации (УПКФРТ);

- ИРС в классическом варианте исполнения.

Все они относятся к категории параметрических регуляторов мощности. Анализ технической эффективности применения рассматриваемых устройств проведен на базе описанного выше варианта 1 развития межсистемных связей энергосистемы Молдовы с энергосистемами соседних стран. В этом варианте предусматривается, как было указано выше, режим синхронной параллельной работы энергосистем при введенной ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава и поэтапном вводе мощности новой электростанции в узле Бельцы (до 450 МВт). Подключение электростанции осуществлено на шины 400 кВ подстанции Бельцы, связь 330 и 400 кВ на этой подстанции осуществляется с помощью авто трансформатора 400/330 кВ. ВЛ 400 кВ является отходящей из энергосистемы Молдовы в энергосистему Румынии, ВЛ-330 кВ Бельцы- Днестровская ГЭС (Украина) соединяет энергосистему Молдовы с энергосистемой Украины, а ВЛ-330 кВ Бельцы-Страшены является внутрисистемной в энергосистеме Молдовы.

При выполнении расчетов в качестве дополнительного было принято условие о том, что суммарная мощность всех остальных генерирующих источников и нагрузок в энергосистеме Молдова не изменяется, а условие необходимости генерации мощности в узле Бельцы обусловлено увеличением транзита мощности через энергосистему Румынии для покрытия дополнительной сосредоточенной нагрузки величиной $(400+j100)$ МВА в одном из узлов 400 кВ.

В качестве основного критерия оценки того или иного режима принято считать значение потока мощности по ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава (P_1+jQ_1) в условиях существования обратного перетока мощности (P_2+jQ_2) со стороны шин 400 кВ к шинам 330 кВ на подстанции Бельцы,(рис.4).

Из рассмотрения данных таблицы 1 следует, что при свободном потокораспределении мощности в системе Бельцы-Сучава линия оказывается явно недогруженной, что не может считаться удовлетворительным. В связи с этим становится необходимым принудительное распределение мощности в ветви между шинами 330 и 400 кВ на подстанции Бельцы, в соответствии с заданными уровнями.

Указанная задача может быть успешно решена при использовании параметрических регуляторов мощности путем их включения по схемам, как показано на рисунках 5,6,7.

При проведении расчетов во всех вариантах сопротивление рассеяния фазорегулирующего трансформатора (ФРТ) принималось неизменным и равным $X_{ФРТ}=30$ Ом. Сопротивление емкостной ветви УПКФРТ и ИРС для сохранения подобия расчетных условий также принято неизменным и равным $X_k=145$ Ом. Сопротивление индуктора для ИРС принято равным $X_{инд}=115$ Ом, в результате чего индуктивная ветвь регулятора (совместно с сопротивлением $X_{ФРТ}=30$ Ом) образует результирующее сопротивление 145 Ом, которое равно по величине, но противоположно по знаку сопротивлению конденсаторной батареи X_k .

Результаты расчетов зависимостей величины передаваемой активной мощности по ВЛ-400 кВ Бельцы-Сучава от углового сдвига, вводимого между векторами входного и выходного напряжений ФРТ параметрического регулятора мощности, установленного между шинами 330 и АТ-330/400 кВ на подстанции Бельцы, показаны на рис. 8 (при отсутствии новой электростанции в узле Бельцы) и рис.9 (при вводе в работу новой электростанции мощностью 450 МВт с выдачей мощности на шины 400 кВ в узле Бельцы).

Анализируя приведенные данные, можно заметить, что вариант УПКФРТ имеет более высокую чувствительность и изменению угла ψ по сравнению с вариантом ФРТ. Вариант ИРС имеет преимущества при положительном ψ и уступает УПКФРТ в диапазоне отрицательных ψ .

При вводе дополнительной генерирующей мощности в узле Бельцы чувствительность к

регулированию практически остается той же, но диапазон углов смещается. При отсутствии новой электростанции в узле Бельцы для обеспечения изменения перетока активной мощности в диапазоне $0 \div (450-500)$ МВт необходимо вводить дополнительный угловой сдвиг $\psi = 0 \div (-30)^\circ$, а при наличии электростанции - $\psi = 20 \div (-10)^\circ$.

Подходы к расчету мощности и стоимости параметрических регуляторов мощности различных типов.

Типовая схема ФРТ строится на базе двухтрансформаторного агрегата, состоящего из связанных между собой через устройство РПН возбуждающего и добавочного трансформаторов. Это влечет за собой двукратное увеличение его расчетной мощности, что существенно влияет на удельную стоимость фазорегуляторов - $S_{ФРТ}$.

Расчетная мощность двухтрансформаторного ФРТ определяется соотношением:

$$S_{ФРТ} = 4 * tg \frac{\psi}{2} * S_H, \quad (1)$$

где S_H - мощность нагрузки или проходная мощность.

Расчетная мощность конденсаторной батареи характеризуется соотношением:

$$S_{ФРТ} = I_k^2 * X_k \quad (2)$$

Расчетная мощность индуктора определяется выражением:

$$S_{инд} = I_{инд}^2 * X_{инд} \quad (3)$$

Заметим, что ток индуктора равен току ФРТ, так как их соединение последовательное.

Индуктор, по сравнению с ФРТ, представляет собой более простое устройство и его удельная стоимость ниже.

Выражения 1-3 позволяют определить мощность элементов параметрического регулятора мощности для различных схем, с учетом заданного значения угла сдвига напряжений величин протекающих токов и соответствующих уровней напряжений.

Удельная стоимость элементов, принятая по различным литературным источникам, составляет: $C_{уд ФРТ} = 15$ \$/ кВА; $C_{уд КБ} = 12$ \$/ кВар; $C_{уд инд} = 5$ \$/ кВар; (принята авторами).

Различные типы параметрических регуляторов мощности характеризуются своими величинами мощности и,

соответственно, стоимостью. Данные расчетов приведены в таблице 6.

Показатели стоимости параметрических регуляторов мощности различных типов

Таблица 6

	Наименование показателей	Единицы измерения	Параметрические регуляторы мощности		
			ФРТ	УПКФРТ	ИРС
1	Передаваемая Мощность по электропередаче	МВА	$-425+j 36=$ $= 430 $	$-425+j 36=$ $= 430 $	$-425+$ $+j 36= 430 $
2	Типы устройств: ФРТ ($\psi = -30^\circ$) -расчетная мощность -ориентировочная стоимость	МВА Млн дол.США	230 3,45		
3	Установка УПКФРТ ($\psi = -25^\circ$) -расчетная мощность -стоимость ФРТ -расчетная мощность конденсаторной батареи (КБ) -стоимость КБ -полная стоимость УПКФРТ	МВА Млн дол.США МВар Млн . дол.США Млн дол.США		63,7 0,95 132 1,6 2,55	
4	Установка ИРС -расчетная мощность -стоимость ФРТ -расчетная мощность конденсаторной батареи (КБ) -расчетная мощность индуктора -стоимость индуктора -полная стоимость ИРС	МВА Млн дол.США МВар МВар Млн дол.США Млн дол.США			84 1,26 127 21 0,105 2,9

Как следует из данных, приведенных в данной таблице, минимальной стоимостью обладает УПКФРТ.

Однако следует отметить, что данный результат получен для схемы, предусматривающей установку параметрического регулятора мощности со стороны шин 330 кВ.

Выполненные аналогичные расчеты для варианта установки параметрического устройства между двумя секциями шин 400 кВ при разделении их на две части с выделением на каждую из них соответствующих мощностей генерации, изменяет расчетные условия. При этом наиболее низкими стоимостными показателями обладает вариант устройства типа ФРТ, что обусловлено значительно меньшим требуемым диапазоном регулирования угла между векторами напряжений в контрольных точках при достижении того же технического эффекта.

Выводы.

1. При рассмотрении вариантов развития межсистемных и внутрисистемных высоковольтных связей в электроэнергетических системах для достижения желаемых показателей необходимо применять средства принудительного регулирования потоков мощности в замкнутых контурах.

1. Целесообразными и эффективными средствами управления потоками мощности являются параметрические регуляторы мощности

различных типов, основанные на принципе введения и изменения угла фазового сдвига векторов напряжений, приложенных к соответствующим узлам ветвей схемы. К таким устройствам относятся фазорегулирующие трансформаторные устройства (ФРТ), устройства продольной емкостной компенсации, регулируемые с помощью ФРТ (УПКФРТ) и устройства типа Interphase Power Controller (IPC).

2. Мощность и стоимость параметрических регуляторов мощности определяется конкретными расчетными условиями.

Литература

1. В.М. Постолатий, Е.В. Быкова. Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния по управляемым двухцепным самокомпенсирующимся линиям электропередачи. Труды международной научно-технической конференции «Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния», 15-19 сентября 2003, Новосибирск, Россия, т.1, с.83-94.

2. Л.П. Калинин, В.М. Постолатий, В.А. Бошняга. Фазовое управление в качестве способа повышения устойчивости электропередачи. Сб. статей "Оптимизация и исследование электрических электрических машин", Кишинев, «Штиинца», 1982, стр. 63 – 74.

3. Application of the interphase power controller technology for transmission line power flow control, F.Beauregard, J.Brochu, Et al., IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.2, April 1997.

4. V.Soldatov, L.Kalinin, M.Chiorsac, D.Zaitsev. Computational technique for the equivalent circuit parameters of transformer with a complex voltage ratio.-Report of the meeting IEEE FACT WG GEC, USA, New York, 1995.

5. Interphase power controller adapted to the operating conditions of networks, J.Brochu, F.Beauregard, Et al.,

