



PS2 – S4-02



Адаптивное отключение потребителей энергоузла при значительных дефицитах активной и реактивной мощности

В.В. ВАСИЛЬЕВ

ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»

Россия

vvv@iaes.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Противоаварийная автоматика, лавина частоты, лавина напряжения, автоматическое ограничение снижения частоты, автоматическое ограничение снижения напряжения, комплексное управление разгрузкой.

1 ВВЕДЕНИЕ

В России и за рубежом самой массовой автоматикой, осуществляющей процесс отключения нагрузки при дефиците активной мощности, является автоматическая частотная разгрузка (АЧР), входящая в состав системы автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ). В России к АЧР подключается до 60% нагрузки [1].

В качестве меры против аварий в распределительных сетях она может быть эффективной в случаях аварийного, режимного или ремонтного выделения части электроэнергетической системы (ЭЭС) на изолированную работу. Однако в таких условиях, когда отделение части сети от ЭЭС является аварийным и внезапным, нужно считаться не только с возможностью сравнительно медленного и плавного снижения частоты, на что рассчитана АЧР, но и с возможностью возникновения более сложных и более опасных процессов:

- большого дефицита мощности и соответствующего быстрого и глубокого снижения частоты (и как следствие развитие лавины частоты), когда быстрого действия АЧР может оказаться недостаточно;
- большого дефицита не только активной, но и реактивной мощности и соответствующего глубокого снижения напряжения (и как следствие развитие лавины напряжения).

В таких случаях процесс может развиваться как лавина напряжения, возникающая до того, как значительно понизится частота. Лавина напряжения может создать настолько глубокий сброс нагрузки, что снижение частоты без воздействия АЧР быстро сменится ее повышением на фоне нарушения работы всех потребителей энергоузла [2]. В указанных случаях нужна автоматика с очень большим быстрым действием, реагирующая на сам факт аварийного разрыва электрических связей, в результате которого район выделяется на автономную работу, и с контролем предшествующего режима, определяющего величину нарушения нормального баланса как активных, так и реактивных мощностей [3].

2 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ

Используя представленные на электротехническом рынке нашей страны устройства АЧР, сложно построить эффективную разгрузку. Это связано, во-первых, с низкой точностью блоков измерения частоты, во-вторых, разгрузка по частоте и по напряжению выполняются раздельно, в-третьих, не учитывается предыдущий режим работы системы и текущее значение

мощности отключаемых нагрузок. Наличие АЧР I, АЧР II и дополнительной разгрузки приводит к большой сложности в построении разгрузки. При этом необходимость использования дополнительной разгрузки (ДАР), осуществляющей быстродействующее отключение заданной мощности при локальных дефицитах мощности с большой скоростью снижения частоты, объясняется только малым быстродействием и низкой точностью замера частоты.

Первые попытки усовершенствовать принципы действия автоматической частотной разгрузки были предприняты ещё в 70-80-х гг. прошлого века. До настоящего момента известны некоторые результаты предыдущих исследований, где предлагаются:

- комбинированная АЧР, которая использует уже имеющуюся в энергосистемах разгрузку и дополняется несколькими очередями по начальной скорости изменения частоты. Назначение очередей по скорости – ускорить разгрузку за счёт более быстрого отключения части потребителей и, тем самым, уменьшить объём отключаемой от АЧР I и АЧР II нагрузки. Для того чтобы очереди по скорости обладали свойством самонастройки на местные и общесистемные дефициты, уставки по скорости принимались едиными для всего энергообъединения, независимо от условия их наилучшей эффективности. Исследование эффективности предложенной АЧР при различных вариантах совмещения объёмов разгрузки по скорости и отклонению частоты показало, что для устранения каскадных аварий и уменьшения отклонений частоты предпочтительно совмещать очереди по скорости с первыми очередями по отклонению;
- автоматическая частотная разгрузка, реагирующая по-прежнему как на абсолютное значение частоты, так и на скорость её снижения. В отличие от комбинированной АЧР эта разгрузка предусматривает отключение потребителей отдельными очередями с разными уставками по частоте, причём уставка первой очереди имеет фиксированное значение, а частотные уставки второй и последующих очередей перестраиваются в зависимости от скорости снижения частоты: чем выше скорость, тем на большую ступень увеличивается частотная уставка и тем быстрее будет происходить отключение потребителей.

В конце 1980-х годов А. Х. Калужный, А. А. Греб, Я. М. Шлемензон и Н. А. Дарков (СибНИИЭ) впервые предложили принципиально новый способ комбинированной АЧР (КАЧР). Потребители предполагалось отключать при одновременном снижении частоты в энергосистеме и напряжения в энергоузле. В целях повышения эффективности АЧР при локализации и ликвидации аварии, а также сокращения объёма отключаемых потребителей предлагалось дополнительно использовать информацию об изменениях скорости частоты и значения напряжения, суммируя полученные отклонения указанных параметров от номинальных показателей и скорости изменения напряжения. На основе нового принципа была выполнена теоретическая оценка эффективности применения АЧР на базе программного комплекса анализа «живучести», разработанного в СибНИИЭ. В ходе этих исследований были выявлены существенные недостатки предложенного метода управления разгрузкой. Установили, что эффективное применение КАЧР возможно только в изолированно работающих энергосистемах или в любых других, где возможно возникновение дефицитов, превышающих 40 % суммарной мощности нагрузки. Таким образом, КАЧР в указанных энергосистемах должна дополнять работу штатной автоматики (АЧР I, АЧР II), а не заменять её. В действии КАЧР не учитывался предшествующий режим работы энергосистемы – важный фактор для эффективного отключения нагрузки. Ещё один существенный недостаток предложенного способа – по-прежнему основным параметром, обеспечивающим работу КАЧР и формирование суммарного воздействия, остаётся снижение частоты. Информация о скорости изменения напряжения и частоты, а также значении напряжения используется лишь при авариях с большим дефицитом мощности. В итоге алгоритм формирования суммарного воздействия КАЧР на потребителей так и не был разработан, а коэффициенты пропорциональности долевого участия различных параметров в суммарном сигнале не были убедительно обоснованы.

Эффективность частотной разгрузки может быть увеличена, если в качестве входного сигнала использовать не только параметр снижения частоты, но и её скорость. Последнее

позволяет практически мгновенно оценивать относительное значение внезапного дефицита мощности и оперативно отключать требуемый объём потребителей. В результате появляется принципиальная возможность исключить избыточное отключение нагрузки и существенно уменьшить глубину снижения частоты.

При тяжёлых авариях, приводящих к большим дефицитам активной мощности, появляется дополнительная опасность – локальных дефицитов реактивной мощности, когда возникает глубокое снижение напряжения, возможность нарушения устойчивости в послеаварийных режимах и дальнейшее развитие аварии – лавина напряжения. Если частотная разгрузка будет отключать потребители в первую очередь в местах с наиболее низким уровнем напряжения, тогда нарушение устойчивости в послеаварийных режимах можно предотвратить.

Кроме того, это позволит совместить в одном устройстве сразу две функции: АЧР и АОСН (автоматическое ограничение снижения напряжения). Тем более что в настоящее время энергосистемы с существующей АОСН обладают недостаточной «живучестью», так как не способны противостоять системному развитию аварий, которые могут вызвать лавинообразные снижения напряжения и тем самым привести к обесточиванию целых энергорайонов, в том числе и потребителей первой категории [4].

3 КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РАЗГРУЗКОЙ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ДЕФИЦИТАХ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Общеизвестно, что быстродействующая категория АЧР I ограничивает глубину снижения частоты, предотвращая недопустимое снижение частоты ниже 45 Гц. Для этого АЧР I отключает потребителей с малой выдержкой времени 0,1—0,5 с при различных уставках по частоте. Длительная работа при частотах 49 Гц и ниже предотвращается с помощью категории АЧР II, которая отключает потребителей с разными выдержками времени при частоте около 48,8 Гц. АЧР I и АЧР II хорошо справляются со своими задачами при сравнительно небольших дефицитах, не превышающих 30% суммарной мощности нагрузок. При больших дефицитах мощности АЧР I, как правило, отключает излишние объёмы нагрузок. Это обусловлено запаздыванием работы АЧР I, которое складывается из выдержки времени АЧР I, времени срабатывания реле частоты, времени отключения выключателей и составляет $\Delta t_{\Sigma} = 0,45-0,85$ с. При ещё больших дефицитах, превышающих 50% суммарной мощности, из-за запаздывания Δt_{Σ} очередей, которые к тому же запускаются не сразу, а по мере снижения частоты, работа АЧР I может не предотвратить снижение частоты ниже 45 Гц. Для предотвращения глубокого снижения частоты в этих случаях помимо АЧР I применяется дополнительная разгрузка, отключающая потребителей по факту отключения генераторов и/или питающих линий. Применение такой противоаварийной автоматики усложняет эксплуатацию и не всегда оказывается эффективным.

Для более эффективного управления нагрузкой (не только отключения, но и включения) предлагается использовать обобщённый параметр, имеющий размерность частоты, следующего вида

$$A_{\Sigma} = k_1 \Delta f_1 + k_2 \frac{d\Delta f_1}{dt} + k_3 \Delta f_2 + k_4 \frac{d\Delta f_2}{dt} + k_5 \int \Delta f_1 dt + k_6 \int \Delta f_2 dt + k_7 \Delta U_1 + k_8 \frac{d\Delta U_1}{dt} + k_9 \Delta U_2 + k_{10} \frac{d\Delta U_2}{dt}, \quad (1)$$

где $k_1...k_{10}$ – весовые коэффициенты, позволяющие задавать различные веса составляющих обобщённого параметра для каждого конкретного случая; $\Delta f_1 = f_{уст.откл} - f$ – снижение текущей частоты (f) ниже заданной уставки на отключение ($f_{уст.откл}$); $\Delta f_2 = f_{уст.вкл} - f$ – снижение текущей частоты (f) ниже заданной уставки на включение ($f_{уст.вкл}$); $\Delta U_1 = U_{уст.откл} - U$ – снижение напряжения (U) ниже заданной уставки на отключение ($U_{уст.откл}$); $\Delta U_2 = U_{уст.вкл} - U$ – снижение напряжения (U) ниже заданной уставки на включение ($U_{уст.вкл}$). Причём можно утверждать, что значение уставки на отключение меньше уставки на

включение (включение отключенного потребителя осуществляется только после восстановления частоты и (или) напряжения в энергосистеме до определённого уровня): $f_{уст.откл} < f_{уст.вкл}$, $U_{уст.откл} < U_{уст.вкл}$.

В соответствии с заданной размерностью суммарного сигнала (A_Σ) весовые коэффициенты в (1) имеют размерности: $k_1 - [о. е.]$; $k_2 - [с]$; $k_3 - [о. е.]$; $k_4 - [с]$; $k_5 - [\frac{1}{с}]$;

$$k_6 - [\frac{1}{с}]; k_7 - [\frac{Г\eta}{B}]; k_8 - [\frac{Г\eta \cdot c}{B}]; k_9 - [\frac{Г\eta}{B}]; k_{10} - [\frac{Г\eta \cdot c}{B}].$$

Использование такого комплексного сигнала для формирования управляющего воздействия позволяет также получить ряд преимуществ по сравнению с традиционной разгрузкой по частоте. Во-первых, использование фактора скорости изменения частоты даёт возможность практически мгновенно оценить возникший дефицит мощности и тем самым ускорить разгрузку энергосистемы (выполнение функций дополнительной разгрузки).

Во-вторых, интегрирование частоты по времени предотвращает её «зависание» на недопустимом уровне (выполнение функции АЧР II). В-третьих, участие в формировании суммарного сигнала воздействия отклонения напряжения и скорости его изменения позволяет ускорить разгрузку в узлах, имеющих наиболее низкие уровни напряжения.

Структурная схема предложенного метода, выполненная в соответствии с выражением (1), представлена на рис. 1. В блоке 1 рассчитывается отклонение частоты от уставки запуска повторного включения. При частотах $f \leq f_{уст.вкл}$ сигнал на выходе этого блока отсутствует $\Delta f_2=0$, в случае $f > f_{уст.вкл}$ на выходе появляется сигнал $\Delta f_2 = f_{уст.вкл} - f$. Блок 2 формирует отклонение частоты от уставки запуска на отключение. При частотах $f < f_{уст.откл}$ (аварийный дефицит мощности) на выходе блока 2 появляется сигнал $\Delta f_1 = f_{уст.откл} - f$, в случае $f \geq f_{уст.откл}$ (нормальный режим) сигнал отсутствует $\Delta f_1=0$.

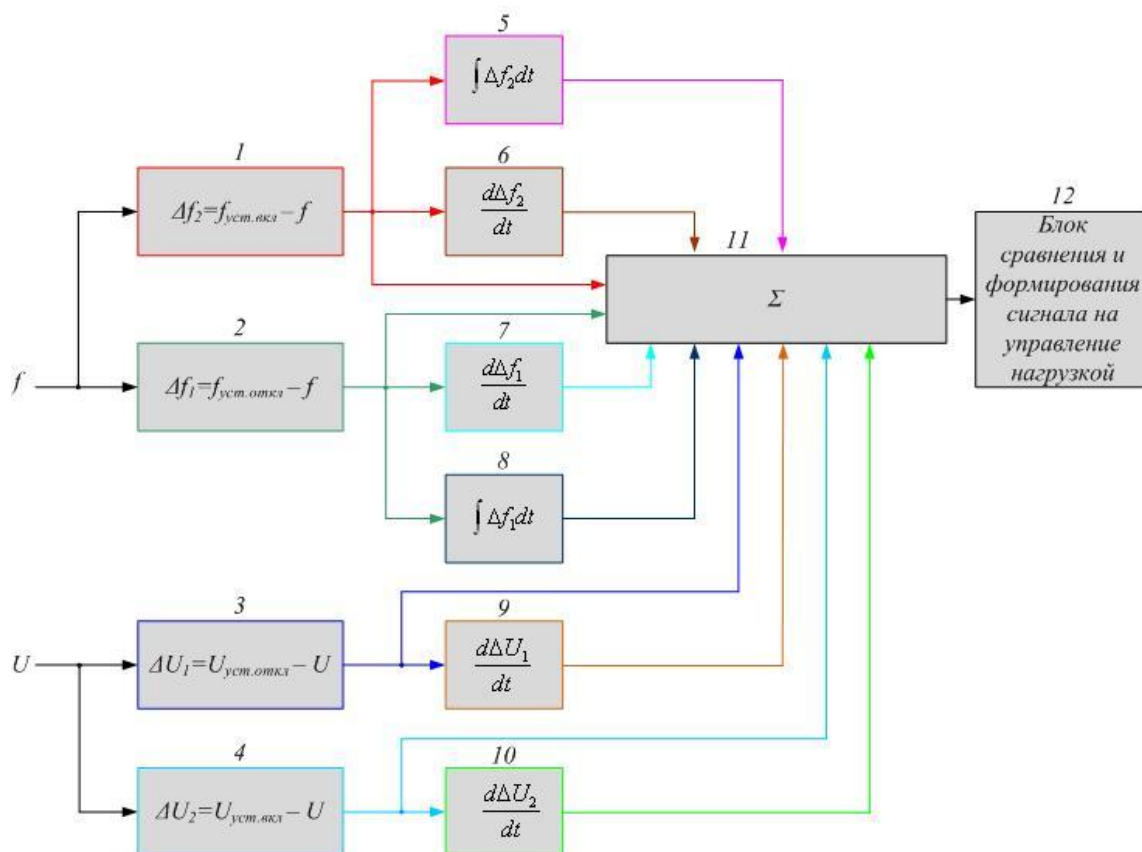


Рис. 1: Функционально-структурная схема формирования обобщенного параметра управления нагрузкой

На выходе блока 3 формируется отклонение напряжения от уставки запуска на отключение. При значениях напряжения $U < U_{уст.откл}$ на выходе этого блока появляется сигнал $\Delta U_1 = U_{уст.откл} - U$, а при $U \geq U_{уст.откл}$ (нормальный режим) сигнал на выходе блока 3 отсутствует ($\Delta U_1 = 0$). В блоке 4 рассчитывается отклонение напряжения от уставки запуска повторного включения. При значениях напряжения $U \leq U_{уст.вкл}$, сигнал ΔU_2 на выходе блока 4 отсутствует ($\Delta U_2 = 0$), при $U > U_{уст.вкл}$ на выходе 4 появляется сигнал $\Delta U_2 = U_{уст.вкл} - U$.

Блоки 6, 7, 9 и 10 предназначены для измерения скорости подъёма частоты, скорости снижения частоты, скорости подъёма напряжения и скорости снижения напряжения соответственно (блоки дифференцирования). А элементы 5 и 8 – для интегрирования отклонения частоты от уставки запуска повторного включения и отклонения частоты от уставки запуска на отключение.

Блок вычислений 11 формирует суммарный сигнал управления разгрузкой, объединяющий составляющие от блоков 1 – 10 согласно выражению (1) со своими весовыми коэффициентами. Заданием этих весовых коэффициентов осуществляется настройка устройства под каждый конкретный случай установки в целях обеспечения требуемого качества переходных процессов при понижении частоты и (или) напряжения в энергосистеме.

Суммарный сигнал от блока 11 поступает на вход блока 12, в котором происходит его сравнение с уставками, а также формирование сигналов на отключение и включение очередей нагрузки.

В случае наступления условия $A_{\Sigma} \geq A_{i\text{откл}}$ с выхода элемента 12 в исполнительный орган выдаётся сигнал на отключение i -ой очереди нагрузки ($i=1 \dots n$). При $A_{\Sigma} < A_{i\text{откл}}$ сигнал на выходе блока 12 отсутствует. В этом же блоке выполняется сравнение этого суммарного сигнала с заданной уставкой на включение отключенной ранее нагрузки $A_{i\text{вкл}}$. При $A_{\Sigma} < A_{i\text{вкл}}$ с выхода элемента 12 подаётся сигнал в исполнительный орган включения нагрузки. При $A_{\Sigma} \geq A_{i\text{вкл}}$ сигнал на выходе органа 12 отсутствует.

Все подключаемые к устройству потребители распределяются в порядке возрастания степени их ответственности. При этом необходимо обеспечить условия

$$\begin{aligned} A_{1\text{откл}} < A_{2\text{откл}} < A_{3\text{откл}} < \dots < A_{n\text{откл}}; \\ A_{1\text{вкл}} < A_{2\text{вкл}} < A_{3\text{вкл}} < \dots < A_{n\text{вкл}}, \end{aligned} \quad (2)$$

причем

$$A_{1\text{вкл}} \leq A_{1\text{откл}}, A_{2\text{вкл}} \leq A_{2\text{откл}}, A_{3\text{вкл}} \leq A_{3\text{откл}} \dots A_{n\text{вкл}} \leq A_{n\text{откл}} \quad (3)$$

При такой организации работы устройства последовательность отключения и включения потребителей не нарушается ни при каких обстоятельствах и будет строго соответствовать степени их ответственности. Порядок включения потребителей – обратный порядку их отключения.

Форма суммарного параметра воздействия на потребителей и сам принцип действия комплексного подхода показан на рисунке 2.

При достижении суммарным сигналом значения уставки $A_{1\text{откл}}$ отключения первой нагрузки в момент $t_{1\text{откл}}$ подаётся сигнал на её отключение ($\Delta P_{откл1}$). По мере возрастания A_{Σ} и выполнения условий $A_{\Sigma} \geq A_{2\text{откл}}$, $A_{\Sigma} \geq A_{3\text{откл}}$ и т.д. происходит отключение следующих нагрузок соответственно ($\Delta P_{откл2}$, $\Delta P_{откл3}$, ..., $\Delta P_{откл n}$) в моменты времени $t_{2\text{откл}}$, $t_{3\text{откл}}$, ..., $t_{n\text{откл}}$, причём последовательность отключения нагрузок строго соответствует порядку возрастания их ответственности. При этом строгая последовательность отключения потребителей соблюдается при любом характере протекания аварийного процесса в энергосистеме (резкое или медленное снижение частоты, одновременное снижение напряжения, каскадное снижение частоты). Если срабатывание этих очередей вызовет подъем частоты, то производная сменит знак, отклонение частоты и, соответственно, суммарный сигнал, начнут уменьшаться. Однако, пока отклонение частоты от уставки на отключение положительно (частота ниже минимально допустимой), интеграл этого отклонения растёт. Это приводит к дальнейшему увеличению суммарного сигнала и срабатыванию очередей разгрузки вплоть до подъёма частоты выше уставки на включение.

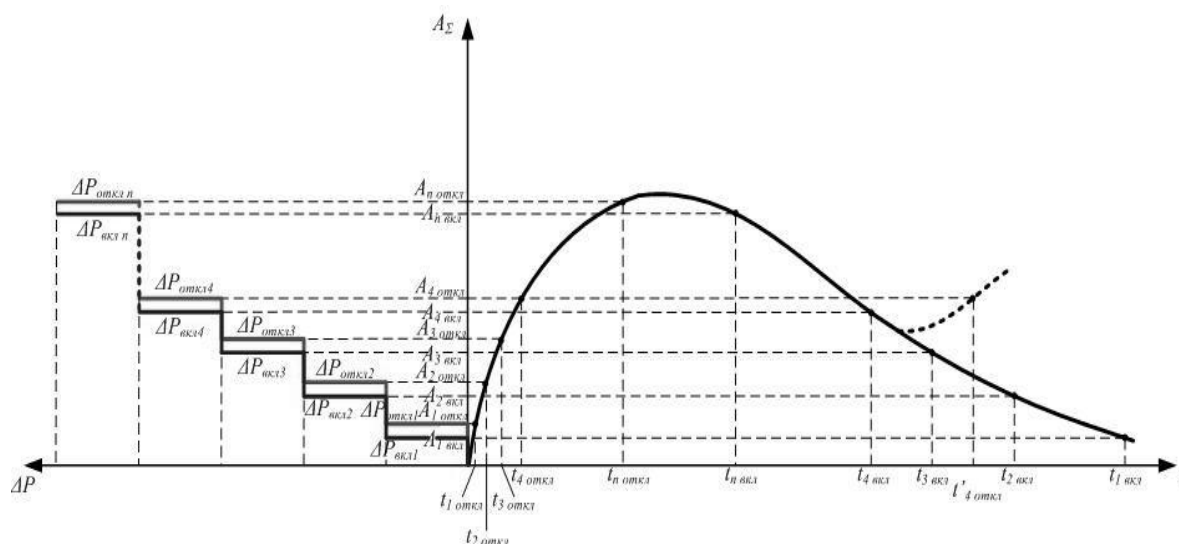


Рис. 2: Принцип действия комплексного управления разгрузкой

При подъеме частоты до уставки срабатывания $f_{уст.вкл}$ суммарный сигнал начинает уменьшаться пропорционально интегралу отклонения частоты от этой уставки. При выполнении условия $A_{\Sigma} < A_{n \text{ вкл}}$ в момент $t_{n \text{ вкл}}$ в блоке сравнения и формирования сигнала на управление нагрузкой формируется команда на включение отключенной ранее n -ой нагрузки ($\Delta P_{вкл \ n}$). По мере снижения A_{Σ} и выполнения условий $A_{\Sigma} < A_{n \text{ вкл}}$ происходит включение потребителей в строгой последовательности по степени их ответственности, обратной последовательности их отключения.

4 ПРОГРАММНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ ПО ЧАСТОТЕ И НАПРЯЖЕНИЮ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Реализовать все желаемые свойства устройства комплексного управления разгрузкой при современном уровне развития техники и электроники, в частности, можно только на микропроцессорной базе.

Разрабатываемое устройство выполняется на базе Комплекса противоаварийной автоматики – КПА-М (разработка и производство ЗАО «ИАЭС»), предназначенный для выполнения функций различных устройств противоаварийной автоматики, устанавливаемых на электроэнергетических объектах [5]. Основным узлом, обеспечивающим ввод аналоговой и дискретной информации о состоянии контролируемого объекта, её обработку и формирование выходных дискретных сигналов, является функциональный блок (БФ). Основные технические характеристики входных/выходных цепей устройства комплексного управления разгрузкой на базе БФ в составе КПА-М сведены в таблице 1.

Наименование параметра	Значение параметра
Входы аналоговых сигналов:	
– номинальное напряжение контролируемой сети $U_{ном}$, В	100/220
– рабочий диапазон напряжения от $U_{ном}$, %	0-130
– пределы допускаемой относительной основной погрешности измерения напряжения в рабочем диапазоне, %	$\pm 2,0$
– номинальная частота контролируемой сети, Гц	50
– рабочий диапазон частоты, Гц	30-65
– рабочий диапазон скорости изменения частоты, Гц/с	от -20 до +20

Табл. 1 (Начало): Технические характеристики автоматической разгрузки

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение параметра</i>
Входы аналоговых сигналов:	
– количество входов по напряжению	2
– абсолютная погрешность измерения частоты, Гц, не более	±0,0003
Входы дискретных сигналов:	
– количество входов	до 32
– номинальное напряжение переменного (постоянного) тока, В	100 (110) 220 (220)
– напряжение устойчивого срабатывания, В, не менее	0,6U _{ном}
– входной ток, мА, не более	5,5
– минимальная длительность сигнала, мс	30
Выходы дискретных сигналов:	
– количество выходов	до 32
– диапазон коммутируемых напряжений переменного (постоянного) тока, В	5-264
– ток замыкания и удержания, А, не более	8
– ток размыкания постоянного напряжения при активно – индуктивной нагрузке с постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$ не более 20 мс, А, не более	0,15

Табл. 1 (Окончание): Технические характеристики автоматической разгрузки

Для обоснования эффективности применения комплексного подхода к управлению нагрузкой исследовались длительные переходные процессы в характерных схемах при авариях различной тяжести. Моделирование снижения частоты с учётом срабатывания очередей разгрузки является затруднительным, т.к. в процессе работы устройства дефицит меняется, а значит, и меняются начальные условия на каждом шаге расчёта. Таким образом, построение кривой снижения частоты оказывается трудоёмким занятием. Поэтому было решено воспользоваться дифференциальным уравнением движения энергосистемы при дефиците активной мощности, которое имеет вид

$$\frac{df_*}{dt} = \frac{1}{T_j} P_{HEB*} = \frac{1}{T_j} (P_{HEB0*} - k_H \Delta f_*), \quad (4)$$

где T_j – постоянная времени энергосистемы; P_{HEB*} – относительный небаланс мощности при текущей частоте; P_{HEB0*} – относительный небаланс мощности при номинальной частоте; k_H – регулирующий эффект нагрузки (РЭН); f_* – текущее значение частоты, отнесенное к номинальному значению; Δf_* – изменение частоты, отнесенное к номинальному значению.

В отличие от частоты напряжение является локальным параметром узла энергосистемы, поэтому, говоря о законе изменения напряжения, необходимо располагать динамической характеристикой нагрузки. Динамические характеристики нагрузки определяют ее поведение при резких изменениях напряжения в узле нагрузки, вызванных аварийными возмущениями.

В результате моделирования изменения частоты энергосистемы при дефиците активной мощности и напряжения в каком-то её узле, где установлено устройство комплексного управления разгрузкой, были получены осциллограммы, представленные на рисунке 3. При возникшем дефиците активной мощности величиной 50% («deficit») благодаря работе устройства частота не снизилась ниже 46 Гц и была восстановлена до номинального значения за 12 с («Frequency»). Форма суммарного параметра («Asum») и характер его изменения совпадают с предполагаемыми кривыми, полученными в ходе теоретических исследований (рис. 2). Для моделирования было заложено пять ступеней срабатывания устройства для управления пятью нагрузками с положениями «1» - включено и «0» - отключено (на рис.3 график «Load», ступени разнесены по оси ординат на единицу). Снижение напряжения (график «Voltage») также оказало влияние на суммарный сигнал.

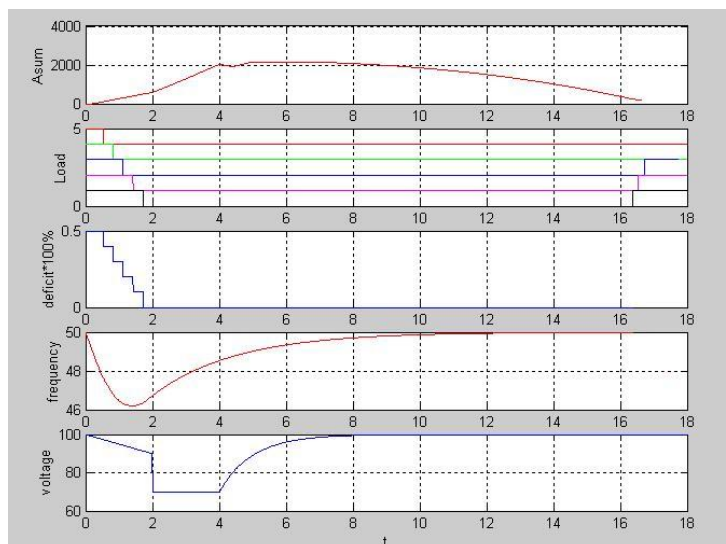


Рис. 3: Функционирование устройства комплексного управления разгрузкой

После отключения нагрузок было произведено их автоматическое включение в обратном порядке после восстановления контролируемых параметров.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение комплексного подхода к управлению разгрузкой по частоте, напряжению и скорости их изменения позволяет:

- 1) повысить общий уровень устойчивости системы в послеаварийных режимах, т.е. повысить живучесть всей энергосистемы;
- 2) уменьшить общее число устройств ПА, действия которых направлены на ликвидацию дефицита мощности, и тем самым исключить несогласованность в их работе, приводящую к излишним отключениям потребителей;
- 3) сократить перерыв питания потребителей после действия комплексной разгрузки и, как следствие этого, сократить ущерб от отключения нагрузки при действии автоматики.

В ходе моделирования работы автоматики комплексного управления разгрузкой при снижении отдельно частоты или напряжения или одновременно частоты и напряжения во всех случаях была зафиксирована правильная работа алгоритма функционирования. Поэтому разработанный принцип управления разгрузкой был рекомендован к внедрению в микропроцессорное устройство для проверки работы в условиях срабатывания, опытной, а затем и промышленной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кучеров Ю.Н., Окин А.А., Мартыненко М.М., Данильчук В.А. Современное состояние автоматической разгрузки энергосистем и пути ее совершенствования // Электрические станции. 2001. № 12.
- [2] Белослудцев К.А., Гуревич Ю.Е. Возможные пути развития аварий, вызванных большим дефицитом мощности // Электрические станции. 2004. № 9.
- [3] Бернер М.С., Брухис Г.Л., Гуревич Ю.Е., Кучеров Ю.Н. Проблемы применения аварийной разгрузки больших распределительных сетей // Электро. 2008. № 5. С. 12-19.
- [4] Алексеев О. П., Максимов Б. К. Противоаварийное управление в энергосистемах при глубоких снижениях напряжения // Энергетик. 2008. № 11. С. 2-4.
- [5] ТУ3435-001-50756329-2010. Комплекс противоаварийной автоматики многофункциональный. Технические условия. ЗАО «ИАЭС». Новосибирск, 2010.