

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СМАРТ-ГРИД ЭНЕРГОСЕТЯХ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

А.П. Никифоров*, канд.техн.наук

Государственное ВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина.

E-mail: apnikiforov@yandex.ua

Предлагается способ совместного совершенствования систем управления, оборудования электроэнергетических сетей, устройств релейной защиты и автоматики. Способ основан на шаблонах обобщенных структур частей системы управления при описании структур критериями оптимизации и ориентирован на сквозное проектирование в САПР систем реального времени. Библ. 3, рис. 3.

Ключевые слова: релейная защита, автоматика, структурно-информационный метод, технический интеллект.

Введение. Для этапа совершенствования конструкций характерна определенность в отношении структуры, параметров объекта управления и защиты (*ОСР*), исполнительных органов (*ЕУ*), алгоритмов устройств релейной защиты и автоматики (*РПА*), динамики переходных процессов (*ТР*) и др. Однако методы, примененные на этапе разработки, как правило, оказываются исчерпанными. Известны сроки обновления оборудования: через год – элементная база, через 5 лет – новое поколение. Появляется задача регулярного совместного совершенствования комплекса алгоритмов и оборудования в САПР. Результатом совершенствования становится техническая документация с программами для перепрограммируемых микросхем устройств. Непрерывность процесса совершенствования подразумевает наличие методов, позволяющих показать пути и перспективы развития связки «*ОСР—ЕУ—устройство РПА*», иметь возможность реструктурировать задачу, выполнить ближайший этап модернизации или получить новое поколение конструкций с заданными показателями качества.

Представление ОСР в энергетике. Концепция смарт-грид подразумевает возможность описания свойств электрических схем ОУЗ через алгоритмы управления. При этом бывает достаточно указать устоявшуюся терминологию и источники математического описания ОУЗ в известной электротехнической литературе. Это позволяет компактно описать решаемую задачу и акцентировать алгоритмы управления. Так, изначально исследования касались *ОСР* «*Контур нулевой последовательности сети (КНПС)*» при резонансно-заземленной нейтрали с автоматической управляемым дугогасящим реактором, среднечастотной селективной защитой и устройствами высокочастотной регистрации сигналов *ТР*. Оказывается, можно оперировать понятием обобщенного *ОСР*. Так в распределительных сетях 6-35 кВ *ОСР* нерасчленима, имеет распределенные параметры, переменную структуру, широкий диапазон изменения параметров. Разделение выходной информации *ОСР* на несущую с промчастотой и *ТР*, ее обработка, формирование управлений выполняются [1, 2] устройствами *РПА* с грамматикой $G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$, где Σ — сумма всех составляющих. Устройства контролируют вход-выход ОУЗ, описываются синхронным детектором и демодулируют смысловые ситуации *SN* из сигналов *ТР*. Описать *ОСР* можно грамматикой $G_{OCP} \approx \Sigma G_{GES} = \Sigma G_{RPA}$. Каждый инерционный контур *ОСР* контролируется соответствующим устройством *РПА*. Систематизация алгоритмов устройств и систематизация ограниченного множества ситуаций *SN* также описывают *ОСР*. Критерии управления устраняют отклонения от ситуации *SI* «*Нормальный режим*» (*NM*) и должны быть устойчивы при *SN*.

Применяемые методы. Методы распознавания образов достаточно универсальны. Поток информации вначале разделяется на элементарные составляющие, реструктурируется по смыслу задачи, затем восстанавливается в новый поток. Под потоком информации подразумеваются также и параметры *ОСР*. Поэтому методы, возникая из разных посылов, формируют подобные решения. Различия методов — в типе задач, для которых они адаптируются. При совершенствовании проявились две особенности методов. Одна критична при смене разработчика или совершенствовании через большой интервал времени. А именно, теряется информация об априорности выбора исходных данных для построения структуры решений и выбора параметров. Как следствие, совершенствование заменяется новой разработкой, сменой подходов. Другая особенность критична при выборе одного из конкурирующих алгоритмов и описаний *ОСР*. Это характерно для алгоритмов, составленных программными, эмпирическими и эвристическими способами. Приемлемым остается традиционный способ передачи сопроводительной информации (структурные схемы, блок-схемы), но учитывающий специфику методов распознавания.

Разрабатываемый структурно-информационный (*SI*) метод основан на структурно-лингвистическом распознавании образов. Проведенные исследования [1, 2] показывают, что его можно применить для многих задач в энергетике, сводящихся к динамическим потокам информации. Среди методов описания информационных потоков можно выделить структурно-операторный метод, используемый в ТАУ, и методы идентификации на основе *RLC*-элементов [3]. Эти методы подготавливают информацию для *SI*-метода. *S*-детектор состоит из смыслового фильтра «*S-filter*» и многопорогового элемента ρN (рис. 1). Является измерителем смыслового сигнала $S(t)$ о состоянии *ОСР*. Сигнал $S(t)$ демодулируется на выходе *ОСР* из несущих сигналов промчастоты сети. Позволяет решать задачи, когда фильтрация и логические сравнения оказываются недостаточными для принятия решений и когда ситуации *SN*, сложные на структурном и смысловом уровнях, приводят к неправильной работе устройств.

Способ передачи информации между разработчиками возможен через шаблоны (рис. 1) — обобщенные эквивалентные структурные (*GES*) схемы [1, 2] устройств *РПА*, *ОСР*, системы автоматической стабилизации нормального режима (*ASNOM*) работы сети и дополнительно — через две систематизирующие таблицы. Одна таблица

TS/SN – соответствия ситуаций SN и первичной информации TS (рис. 2); другая – сравнения Ψ -структур GES_{RPA} , где $A < \Psi < Z$ (рис. 3). Основой схем GES_{RPA} является смысловой S -детектор «For-Against» или «Селективность–Блокировка». Его автоматы $MorphA$, $SyntA$, $SemA$ формируют сигнал $S_{SMART}(t) = \text{Fix}[\beta \times f(\Sigma KSN(t) - \Sigma KBM(t))]$, где $N, M = 1, 2, \dots$, контролируемый элемент $\rho N \varepsilon_{SMART}(t) = \rho(1 - S_{SMART}(t))$, $S_{RE}(t) = f(\rho N < \varepsilon_{SMART}(t) < \rho(N+1))$, $N = 2, 3, \dots$. Схемы GES состоят как из отдельных TS , правил P в устройстве RPA , участка ZN , всей сети, так и из их совокупности. Тогда при совершенствовании вносимые изменения будут отмечаться на составляющих схем GES и оптимизироваться по отношению к формированию сигнала $S(t)$. При разработке эта информация становится базовой.

Постановка задачи. Согласно теоремам «О возможности формирования смыслового сигнала в устройствах RPA » [1] и «О единстве структурных схем устройств RPA » [2] схемы GES можно использовать в качестве шаблонов (рис. 1). Требуется получить критерии оптимизации в системе $ASNOM$, изучить возможность передачи минимума информации для последующих этапов совершенствований.

Оптимизация на основе SI-метода. Разделим систему $ASNOM$ на оптимизируемые части:

1. OCP с G_{OCP} ;
2. Информационная часть S -детектора с G_{RPA} и GES_{RPA} ;
3. Пороговая часть с ρN и экспертной системой ExS , уставкой порога «Нормальный режим» (NM);
4. Система $ASNOM$ для одного OCP ;
5. Система $ASNOM$ для множества OCP .

В статьях [1, 2] приведены исходные положения для оптимизации, предложено несколько критериев, касающихся OCP , алгоритмов RPA . В данной статье рассматриваются критерии, описывающие S -детектор. Возможность разделения информационного потока на элементарные составляющие позволяет выполнять численные сравнительные расчеты соотношений между составляющими. Для оптимизации заполняется таблица [2] соответствия TS/SN (рис. 2), описывающая передаточную функцию части системы $ASNOM$ (рис. 1). Для ее заполнения устанавливаются возможные смысловые ситуации SN и терминальные символы TSN . Исходя из нее, определяются контрольные показатели или качественные характеристики, а также рассчитывается диаграмма изменений $S(t)$ для каждой SN , стилизованная под TP в OCP . Устанавливаются значения порогов ρN . Начальным порогом является $\rho 1$ – « NM » (рис. 1), далее $\rho 2$ – «Нераспознаваемая ситуация» (Not), $\rho 3$ – «Критический режим» (PM), $\rho 4$ – «Пред-аварийный» (EM), $\rho 5$ – «Аварийный» (AM). В таблице сравнения Ψ -структур учитываются схемы GES_{RPA} (рис. 3). Сравнения выполняются по двум осям «Селективность–Блокировка». Для каждой Ψ -структуры [1, 2] рассчитываются соответствующие суммарные коэффициенты $K_{\Sigma SB}(\Psi) = K_{\Sigma S}(\Psi) + K_{\Sigma B}(\Psi)$, где $K_{\Sigma S}(\Psi) = \Sigma KSN(\Psi)$, $K_{\Sigma B}(\Psi) = \Sigma KBM(\Psi)$, коэффициент эффективности $K_{EFF}(\Psi) = K_{\Sigma SB}(\Psi) / K_{\Sigma SB}(Z)$. Например, алгоритмы RPA сводятся к наличию только одной Z -структуры. При этом авторы алгоритмов оставляют за собой право не выполнять оптимизацию до Z -структуры. Тогда коэффициент $K_{EFF}(\Psi)$ численно покажет оптимальность Ψ -структуры.

Критерий №1 «Соответствие числа SN и TS ». При изменениях сигнала $S(t)$ ситуация SN должна определяться минимальным, но достаточным количеством информационных датчиков TS в автомате $MorphA$ (рис. 1). Критерий относится к таблице соответствия TS/SN (рис. 2). Вначале учитываются селективные TSS и перечень ситуаций $SN = \Sigma K \times TSSN$. Для масштабирования выбирается ситуация SN « EM » с максимальным отклонением сигнала $\max S(t) = 1$. Для каждой ситуации SN сигналы $S(t)$ сравниваются между собой в зоне максимального отклонения t_{MAX} , так $S1(t_{MAX}) \neq S2(t_{MAX}) \neq \dots \neq SN(t_{MAX})$. Критерий оптимальности выполнится, когда установится соответствие значимости $SN \leftrightarrow \rho N \leftrightarrow \Sigma TSSN$ для каждой SN и ее отличие от других ситуаций $S1 < S2 < \dots < SN$. При этом число, смысл, веса каждого TSS окажутся достаточными для отличия каждой SN и этим опишут (проявят) структуру OCP . Полученные результирующие составляющие также заносятся в таблицу TS/SN . Это позволяет сохранять информацию об априорности принятых решений. В случае неразличимости SN требуется ввести изменения в $MorphA$ или $SyntA$. Назначаются методом экспертной оценки:

а) значимость Q_{SN} ситуации SN . Величина $Q_{SN} = SN / SN_{MAX}$ показывает, насколько значительна каждая ситуация SN для описания OCP или насколько отличается SN от ситуации $S1$ « NM »;

б) значимость TS . Каждому селективному TSS назначается весовой коэффициент K_{SN} показывающий значимость этого TSS в сигнале $S(t)$, согласно $K_{S1} < K_{S2} < \dots < K_{SN}$. Довесок δ для $K_{SN} = \delta K_{SN-1}$ может изменяться нелинейно, устанавливая оконную весовую функцию для смыслового « S -filter». Окно может быть «треугольное, нарастающее» $W_k(n) = 2n / (N-1)$, $n = 0 \dots N-1$ в свертке $H(z) = \Sigma h(n) W_k(n) z^{-n}$. Шаг n определяет интервал между появлениями нетерминальных символов (NTS) в схеме GES . Применение задаваемых параметров для окна $W_k(n)$ и его базового коэффициента K_{MIN} в $SyntA$ схемы GES позволяет выполнить численный расчет S -детектора. Для сигнала $\max S(t) = \beta \times \Sigma K \times TSSN = 1$, где β — масштабный коэффициент, устанавливающий равенство $\max S(t) = 1$;

в) определение порогов ρN . Назначаются пороги $\rho 1 < \rho 2 < \dots < \rho N$, определяющие зоны отклонений $\Delta \rho$ между

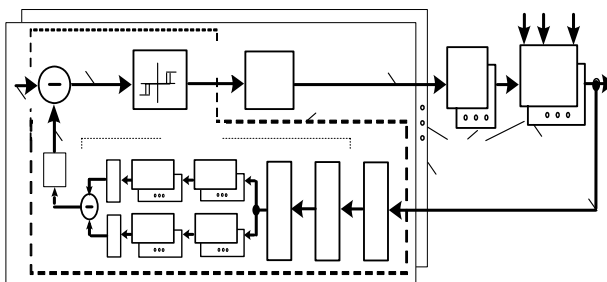


Рис. 1

	p	$\rho 1$	$\rho 2$	$\rho 3$	ρn	ρ "TS"	Weight TS
n	S	$S1$	$S2$	$S3$	\dots	SN	S_{test}
i	TSS, TSB	1	0	0	0	1	$kTS, s\text{-step}$
2	$TS S2$	0	1	0	0	1	$min\ kTS$
\dots							
	ΣKTS	$min\ \Sigma KTS$				$max\ \Sigma KTS$	-
	$k\rho = 1 / \Sigma kTS$	$min\ k\rho$				1	-

Рис. 2

		Selectivity (For, ΣKSN)		
Blocking		\dots	$\Sigma KSN(\Psi)$	\dots
		$\Sigma KBM(A)$	A	
		$\Sigma KBM(\Psi)$	Ψ	
		$\Sigma KBM(Z)$		Z

Ψ – name of the Ψ -structure,
 $P_{\Sigma}, K_{\Sigma}, K_{EFF}, K_{\Sigma EFF}$
 Z – $GES_{RPA}, P_{\Sigma} = \max,$
 $K_{\Sigma} = \max, K_{EFF} = 1, K_{\Sigma EFF} = \max$

Рис. 3

порогами pN , в которых может оказываться смысловой сигнал $S(t)$;

г) *сравнение грамматик G_{Ψ}* . Оцениваются число и значимость составляющих грамматики G_{Ψ} для каждой известной Ψ -структуры, $\Psi=A, B...Z$.

Критерий №2 «Соответствие селективности и блокировки в Ψ -структуре RPA». Заполняется таблица сравнения Ψ -структур (рис. 3). Составляющая «Against» сигнала $S(t)$, порождаемая правилами блокировки PB , предотвращает неселективное изменение сигнала $S(t)$ от помех в OCP (рис. 1). Величины составляющих селективности и блокировки должны быть сопоставимы по величине $K_{\Sigma S} \approx K_{\Sigma B}$ или $S(t) = \langle \text{For-Against} \rangle \rightarrow 0$ и менее $\Delta p1 \ll NM$. Например, авторский алгоритм может быть более сконцентрирован на правилах селективности PS , тогда при совершенствовании следует добавить определенное число правил блокировки PB согласно схеме GES_{RPA} .

Критерий №3 «Минимум отличия Ψ -структуры RPA от схемы GES_{OCP} ». Сравняются по таблице Ψ -структуры между собой и с обобщенной Z -структурой GES_{RPA} , затем сравниваются с GES_{OCP} (рис. 1). По коэффициентам селективности KS и блокировки KB согласно $\Psi_{OCP} \approx \Psi_{RPA} = \Psi^{OPT} = Z - \Psi = K_{\Sigma S}(Z) - K_{\Sigma S}(\Psi) = K_{\Sigma B}(Z) - K_{\Sigma B}(\Psi)$, устанавливается критерий оптимизации — отклонение $\Delta \Psi^{OPT} \rightarrow 0$ или $\Delta \Psi^{OPT} \rightarrow \min$. Тогда более эффективной Ψ -структурой будет та, которая имеет $K_{\Sigma P} \rightarrow \max$, $K_{EFF} \rightarrow 1$, $K_{\Sigma SB} \rightarrow \max$, $\Psi \rightarrow Z$. т.е. более полно описывает структуру OCP . Так, определяются TS, NTS, P для добавления к оптимизируемой Ψ -структуре.

Критерий №4 «Суммарный коэффициент $K_{\Sigma EFF}$ эффективности Ψ -структуры RPA». Рассчитывается $K_{\Sigma EFF} = [0.5(K_{\Sigma P}^2 + K_{\Sigma SB}^2 / K_{MIN})]^{1/2}$ для каждой Ψ -структуры (рис. 3). $K_{\Sigma EFF} \rightarrow \max$ и обобщает эффективность по двум направлениям — количеству N правил P и по весам K правил P . Базовый коэффициент K_{MIN} отстраивает сигнал $S(t)$ от помех. Выбрано, например, $K_{MIN} = 5/15$ (аналог/импульсная реализация). Чем больше правил P, TS, NTS , тем качественнее (с большей точностью) распознается ситуация SN и отличается от других SN . Таким образом, количество правил P должно соответствовать Z -структуре GES_{RPA} . Исходя из схемы GES_{RPA} и расчетов $K_{\Sigma P}$, нельзя ввести критерий эффективности $K_{\Sigma P} \rightarrow \min$, т.е. устройство RPA не может состоять из одного правила P .

Критерий №5 «Соответствие популярности P_p и эффективности K_{PEFF} правил P » или «Соответствие эффективности K_{PEFF} и затратности K_S реализации правил P ». $K_{PEFF}(P) = K(P)/K(P_S SB)$, где $P_S SB$ — корневое правило P в GES . Популярностью $P_p = \sum P_{\Psi}$ можно назвать предпочтение применения правила PSN, PBM авторами устройств RPA . Под затратностью K_S будем понимать цену реализации правила P относительно других правил P . Затратность K_S может существенно отличаться для разных Ψ -структур в зависимости от способа реализации. Популярность P_p и затратность K_S указываются методом экспертной оценки. Строятся диаграммы соответствия $P_p / K_{PEFF}, K_{PEFF} / K_S$ аналогично известному методу функционально-стоимостного анализа и устраниваются чрезмерные отклонения относительно среднего показателя. Влияние экспертной оценки этим методом сводится к минимуму. В случае формирования новым блоком сразу более весомого правила P проявляется общая эффективность устройства.

Выводы. Предложены сравнительные критерии оптимизации, исходя из шаблонов обобщенных схем GES для $OCP, RPA, ASNOM$. Критерии позволяют формализовать задачи совершенствования, расчета, сквозного моделирования в САПР. Критерии и шаблоны становятся составляющими SI-метода. В итоге специфика сопроводительной информации состоит из указания пути внесенных изменений в шаблонах. Согласно критериям выполнено совершенствование устройств RPA — терминала «Т-КНПС-АРК», селективной защиты «У-СП», высокочастотного регистратора «У-ВЦР» для их совместной работы в сетях 6-35 кВ smart-грид с катушкой Петерсена.

1 Никифоров А. П. Теорема о наличии смыслового сигнала в системах релейной защиты DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921

2 Nikiforov A. Unified smart-detector for electrical power smart grid networks. DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487

3. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике. – Донецк: РБА ДонНТУ, 2005. – 306.

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ В ЕНЕРГОМЕРЕЖАХ СМАРТ-ГРІД НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ

А.П. Нікіфоров, канд.техн.наук

Державний ВУЗ «Донецький національний технічний університет»

пл. Шибанкова, 2, Червоноармійськ, 85300, Україна. E-mail: apnikiforov@vandex.ua

Пропонується спосіб спільного вдосконалення систем управління, устаткування електроенергетичних мереж, пристроїв релейного захисту та автоматики, заснований на шаблонах узагальнених структур частин системи управління та орієнтований на розробку в САПР систем керування реального часу. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: релейний захист, автоматика, структурно-інформаційний метод, технічний інтелект

OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEMS IN A SMART GRID THE POWER GRID ON THE BASIS OF GENERALIZATION OF INFORMATION FLOWS

A.P. Nikiforov

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University",

2, Shybankova Square, Krasnoarmiysk, Donetsk region, 85300, Ukraine. E-mail: apnikiforov@vandex.ua

A method of joint governance, hardware, electric power networks, relay protection and automation. The method is based on templates generic structures of parts of the information management system. Proposed description of structures criteria optimization. The method is focused on development in CAD of systems real-time. References 3, figures 3.

Key words: relay protection, automatics, structural-information method, technical intelligence, detection, modelling

1. Nikiforov A.P. Theorem on the availability of semantic signal relaying systems. DOI: 10.13140/RG.2.1.3713.1921 (Rus)

2. Nikiforov A. Unified smart-detector for electrical power smart grid networks. DOI: 10.13140/RG.2.1.1812.6487

3. V. Sivokobylenko, 2005. *Matematicheskoe modelirovanie v elektrotehnike i energetike*. Donetsk: RBA DonNTU: 306. (Rus)

Надійшла 05.02.2016

Остаточний варіант 21.06.2016