

O processamento paralelo na análise de sistemas eléctricos de energia

A. VIEGAS DE VASCONCELOS

Eng.º Electrotécnico (U.P.)

Bolseiro de DAAD

resumo

O processamento paralelo pode ajudar o analista de Sistemas Eléctricos de Energia a ultrapassar dificuldades computacionais. Para tirar partido dos novos computadores é necessário compreender a sua arquitectura, reformulando os problemas a resolver segundo os princípios do processamento paralelo. Algumas experiências são discutidas.

abstract

The parallel processing can help the analysis of power systems avoiding some computational difficulties. In order to achieve a better use of new computers it is important to understand their architecture, formulating situations according parallel processing. Some results are discussed.

1. Introdução

A análise de Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) é indissociável dos instrumentos de cálculo colocados à disposição do engenheiro. A introdução do computador digital, nos anos 50, para simulação de sistemas eléctricos, constituiu uma evolução notável. A simulação analógica, até aí utilizada, foi preterida em favor da simulação digital, mais exacta e mais flexível. A simulação digital de SEE induziu a adopção de novos métodos de análise e o desenvolvimento de novas técnicas matemáticas. Assim, por exemplo, a análise segundo a lei das malhas foi substituída pela análise nodal e o tratamento matricial foi sucessivamente refinado (técnicas de esparsidade, entre outras).

O computador tornou-se rapidamente um instrumento indispensável ao planeamento e à exploração de SEE. Vários factores explicam esse facto, nomeadamente:

- o aumento exponencial dos consumos de energia eléctrica, que obrigou à construção de vários centros produtores e à expansão das redes que acabaram por ser interligadas a nível internacional;
- o aumento das exigências dos consumidores em matéria de continuidade e qualidade de serviço;
- o aumento dos investimentos em jogo, obrigando a estudos técnico-económicos detalhados;
- as normas de segurança que se foram tornando mais restritivas;
- a consideração de factores ecológicos.

No entanto, a evolução do computador em termos de velocidade e capacidade de cálculo ficou sempre

aquém das necessidades do engenheiro de SEE. As dificuldades computacionais resultam, entre outras, das seguintes causas:

- a dimensão da rede: à medida que o SEE se expande aumenta o volume de dados a tratar;
- o rigor dos modelos: para diminuir a margem de erro é necessário melhorar o detalhe dos modelos. Alguns modelos tornam-se então extremamente complexos;
- a interpretação dos resultados: uma análise caso a caso não é satisfatória. Técnicas de optimização e métodos estatísticos foram introduzidos;
- a necessidade de controlo em tempo real: a ocorrência de alguns «black-outs» em grande escala revelou que a exploração de SEE só é viável pelo recurso ao controlo automático. Simulações dinâmicas têm assim de ser efectuadas em muito curto espaço de tempo.

Alguns sinais permitem contudo alimentar a esperança de que as dificuldades computacionais venham a ser ultrapassadas. Os argumentos seguintes são decisivos:

- Muito provavelmente, o novo «hardware» irá no futuro ser projectado de acordo com as suas aplicações. O engenheiro de SEE terá a possibilidade de especificar o equipamento que melhor se adapta às suas necessidades.
- A diminuição dos custos do «hardware» permite encarar a hipótese de implementar grandes sistemas distribuídos de micro ou mini-computadores. Isto pode ser particularmente importante no controlo de redes de distribuição, onde até agora as aplicações do computador não estão difundidas.
- Os novos computadores «general-purpose», já disponíveis ou que o estarão num futuro próximo, usam processamento paralelo. Eles são por isso mais potentes que o tradicional monoprocessador e irão ter um impacto comparável à introdução do computador digital nos anos 50.

No presente artigo discute-se apenas a importância desta classe de processadores, explicando as razões do seu aparecimento e descrevendo as principais características. A aplicabilidade das várias arquitecturas à análise de SEE é também discutida.

2. A evolução do computador

Podemos situar em 1812, com o aparecimento da «difference engine» de Charles Babbage, o nascimento das modernas máquinas de cálculo. Com o ENIAC (1946) e o UNIVAC I (1951), deu-se início à era do computador. A partir daí, o desenvolvimento tecnológico permitiu uma evolução rápida: das válvulas (primeira geração) aos transistores (final dos anos 50), destes aos circuitos integrados (anos 60) e à integração em média e grande escala (anos 70), os componentes foram sendo melhores, mais fiáveis e mais baratos.

Esta rápida evolução (as performances aumentaram 10 vezes em cada 3 anos) assentava quase exclusivamente na utilização de melhores componentes. A estrutura básica do computador permanecia inalterada, englobando 4 unidades:

- unidade de controlo (CU)
- unidade aritmética e lógica (ALU)
- unidade de memória
- unidade de entrada/saída (I/O).

Enquanto a evolução tecnológica seguiu uma lei exponencial, poucas inovações surgiram nesta estrutura. Com a integração em muito grande escala (VLSI), o desenvolvimento tecnológico entrou, contudo, numa zona de saturação. A partir de um certo ponto, a micro-electrónica encontrou limites de natureza geométrica, térmica e relativista. O desenvolvimento dos componentes fez-se então a um ritmo mais lento e com custos mais elevados. Para obter melhores performances foi necessário inovar noutra direcção.

A evolução tecnológica, se por um lado melhorou a velocidade e a capacidade de cálculo, por outro lado gerou a convicção de que a configuração clássica, assente em 4 unidades independentes, era a mais vantajosa. Cedo se verificou, todavia, que permitindo o funcionamento simultâneo de algumas unidades o rendimento global aumentava. Surgiu assim um primeiro esboço de paralelismo.

O paralelismo como uma nova filosofia de processamento só se impôs nos anos 70. A ideia básica do processamento paralelo é simples: multiplicando ou desdobrando a CU e/ou a ALU, isto é, distribuindo o esforço computacional por várias unidades, o funcionamento global irá depender em primeira linha do número de unidades em serviço e não das características tecnológicas de cada unidade.

Várias estruturas foram propostas e implementadas, sendo difícil encontrar um sistema de classificação que seja simultaneamente simples e completo [7]. Ao analista de SEE a arquitectura do computador

apenas lhe interessa na medida em que ele influencia a estrutura dos seus programas e a selecção dos métodos de resolução mais adequados. Podemos por isso, de um modo simplificado, dividir os processadores paralelos em 4 grupos, de acordo com o quadro I.

QUADRO I

DIVISÃO DOS PROCESSADORES PARALELOS

N.º DE	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
CUs	n	1	1	m
ALUs	n	n	n/n	m

O caso 1 corresponde ao multiprocessador (1 processador = 1 PU = 1 CU + ALU). As várias unidades encontram-se entre si de algum modo interligadas, pelo que vários programas ou várias partes de um programa podem ser processados ao mesmo tempo.

O caso 2 corresponde a um «array processor». Várias palavras (data words) de um mesmo programa podem ser simultaneamente processadas.

O caso 3 é designado por «arithmetic pipelining». As operações aritméticas são divididas em várias fases (por exemplo) «fetch», «normalize», «add», «renormalize», etc.) correspondendo cada fase ao processamento num dos n sub-níveis da ALU. Os dados têm de ser previamente agrupados, fluindo depois entre os vários níveis da ALU como numa cadeia de produção.

Aparentemente o caso 4 não se destingue do caso 1, sendo também um multiprocessador. A diferença reside no modo de interligação dos processadores; aqui eles estão ligados em série, dando origem a «macro-pipelining».

Os diferentes casos não são entre si incompatíveis. Os supercomputadores tipo CRAY resultam da sobreposição dos casos 2 e 3, isto é, incluem várias ALUs, cada uma delas usando «pipelining»; as ALUs podem funcionar em paralelo ou em cadeia.

Não discutiremos aqui os méritos e os inconvenientes de cada solução. Como é óbvio, todas as formas de paralelismo permitem um ganho de velocidade relativamente ao processamento tradicional (sequencial). Além dessa vantagem comum, o multiprocessador apresenta porém algumas características que o tornam mais atraente para a simulação de SEE. Enunciam-se as 4 propriedades mais relevantes do multiprocessador, quando comparado com o monoprocessoador:

- maior velocidade: a utilização de N unidades idênticas permite teoricamente reduzir o tempo T , requerido por um só processador para efectuar uma dada tarefa, para T/N . No entanto, a troca de informações e operações de sincronização degradam esse valor óptimo. Certas «leis» que pretendem impor um limite de $\log_2 N$ (Minsky) ou $N/\log N$ (Woslton) revelam-se porém exageradamente pessimistas. Resultados experimentais comprovam um ganho substancial de velocidade [6];
- maior fiabilidade: no caso de avaria de uma unidade o multiprocessador pode ser automaticamente reconfigurado assegurando as restantes unidades o funcionamento sem interrupção (característica designada habitualmente por «fault tolerance»);
- maior flexibilidade: o multiprocessador pode funcionar com diferentes configurações, adequadas a diferentes tarefas;
- fácil expansão: uma estrutura modular adequada permite aumentar a capacidade do processador sem que a complexidade e os custos aumentem de modo sobre-proporcional.

Os problemas que o novo «hardware» coloca ao engenheiro de computadores (compilador, sistema operativo, linguagens, etc.) não serão aqui abordados. Na secção seguinte discute-se a possibilidade de explorar as várias formas de processamento paralelo na análise de SEE.

3. O processamento paralelo em SEE

O advento dos processadores paralelos coloca ao analista de SEE algumas questões delicadas. Não basta especificar um computador em termos de velocidade e capacidade de cálculo; é agora imprescindível estudar a arquitectura que melhor se adapta aos problemas de análise de SEE. A variedade de protótipos e de máquinas já comercialmente disponíveis dificulta essa escolha.

Duas atitudes são possíveis perante o processamento paralelo:

- uma atitude tímida, que procura retirar vantagens do processamento paralelo, mantendo tanto quanto possível os algoritmos tradicionais;
- uma atitude radical, capaz de reformular a análise de SEE libertando-se de uma longa tradição

de «pensamento sequencial», criando para o efeito novos algoritmos e/ou novos métodos de solução.

A atitude tímida não só é a mais cómoda, como parece à primeira vista a mais razoável. Sendo incerto o futuro de muitos projectos, não parece aconselhável investir tempo e dinheiro em investigação cuja aplicabilidade é duvidosa. No entanto, só uma atitude inovadora pode trazer, a longo prazo, vantagens apreciáveis. A introdução do processamento paralelo pode então provocar uma revolução semelhante à introdução do computador digital nos anos 50.

Um exemplo «tímido» corresponde à utilização de «vector processors». Estes supercomputadores, utilizando «pipelining», requerem uma taxa elevada de operações de tipo vectorial. É então necessário identificar as partes de um programa susceptíveis de tratamento vectorial, o que pode inclusivamente ser feito através de um pré-compilador, gerando automaticamente as instruções necessárias a tal tipo de processamento. Neste caso, o analista de SEE quase não precisa de alterar os seus programas.

Acontece, porém, que uma parte substancial do tempo de execução dos principais programas (entre 35 % e 60 %, para programas de fluxo de cargas e de estabilidade) é ocupada na resolução de grandes sistemas lineares algébricos. Estes sistemas caracterizam-se por um elevado grau de esparsidade com carácter aleatório. As técnicas de factorização, utilizadas em processamento sequencial, não deram bons resultados quando aplicadas num «vector processor». Várias alterações foram propostas e vários algoritmos foram experimentados. No fim chegou-se à conclusão que dado o grau habitual de esparsidade em SEE a utilização do vector «processor» não é rentável.

Este exemplo ilustra a insuficiência da atitude tímida. Só criando novos algoritmos, adequados à estrutura em causa, é possível concluir sobre o grau de adaptação de uma arquitectura relativamente aos problemas de análise de SEE. A aplicação do processamento paralelo passa pelo desenvolvimento de algoritmos óptimos em função do tipo de paralelismo usado; esta é uma condição necessária mas não suficiente para a sua aplicabilidade.

De certo modo, a técnica de «pipelining» é já só uma forma tímida de paralelismo. Uma solução mais evoluída é designada por «alternating parallel-sequential processing». Trata-se de um multiprocessador contendo os módulos idênticos controlados por um «process-computer». O funcionamento de um sistema deste tipo consiste na repetição cíclica de 3 fases, a saber:

— fase de controlo: os módulos são activados pelo «process-computer»;

— fase autónoma: todos os módulos trabalham em paralelo e de modo autónomo;

— fase de troca: quando todos os módulos tiverem terminado a sua tarefa, o «process-computer» procede à troca de dados.

Um SEE pode então ser dividido em n regiões (usando, por exemplo a técnica de diakoptics), sendo a análise de cada região afectada a um processador. O «process-computer», além de proceder às operações preliminares indispensáveis, sincroniza os n módulos, procede à troca de dados e coordena os resultados parciais.

Um sistema deste tipo é relativamente fácil de programar. Os programas tradicionais podem ser usados em cada um dos n módulos, apenas o «process-computer» necessitando de instruções especiais. Por outro lado, os resultados parciais são fáceis de interpretar, a relação rede eléctrica/multiprocessador é fisicamente sugestiva. Alguns inconvenientes devem ser no entanto assinalados, nomeadamente:

— o custo e a vulnerabilidade das ligações entre os módulos e entre estes e o «process-computer»: o barramento de interligação representa a parcela mais cara do «hardware» e é susceptível de frequentes avarias;

— o atraso provocado pela sincronização: alguns módulos irão esperar bastante tempo até que o último módulo tenha terminado a sua tarefa;

— problemas de engarrafamento: quando a troca de dados é muito intensa, corre-se o risco de saturar o barramento e de despender muito tempo nessa operação;

— dificuldade de expansão: o alargamento do sistema informático implica a utilização de um barramento, com os custos e a complexidade inerentes.

Uma estrutura como a do EGPA (Erlangen General Purpose Array) permite manter a complexidade local a nível constante (fig. 1). Um conjunto de 5 blocos é interligado de modo a constituir uma pirâmide. A introdução de novas camadas, embora aumentando o número global de ligações, mantém inalterado o número máximo de ligações por módulo (4 ligações equiplanares, mais 2 ligações interplanares). Deste modo, evitam-se os problemas inerentes à solução anteriormente descrita, diminuindo efeitos de engar-

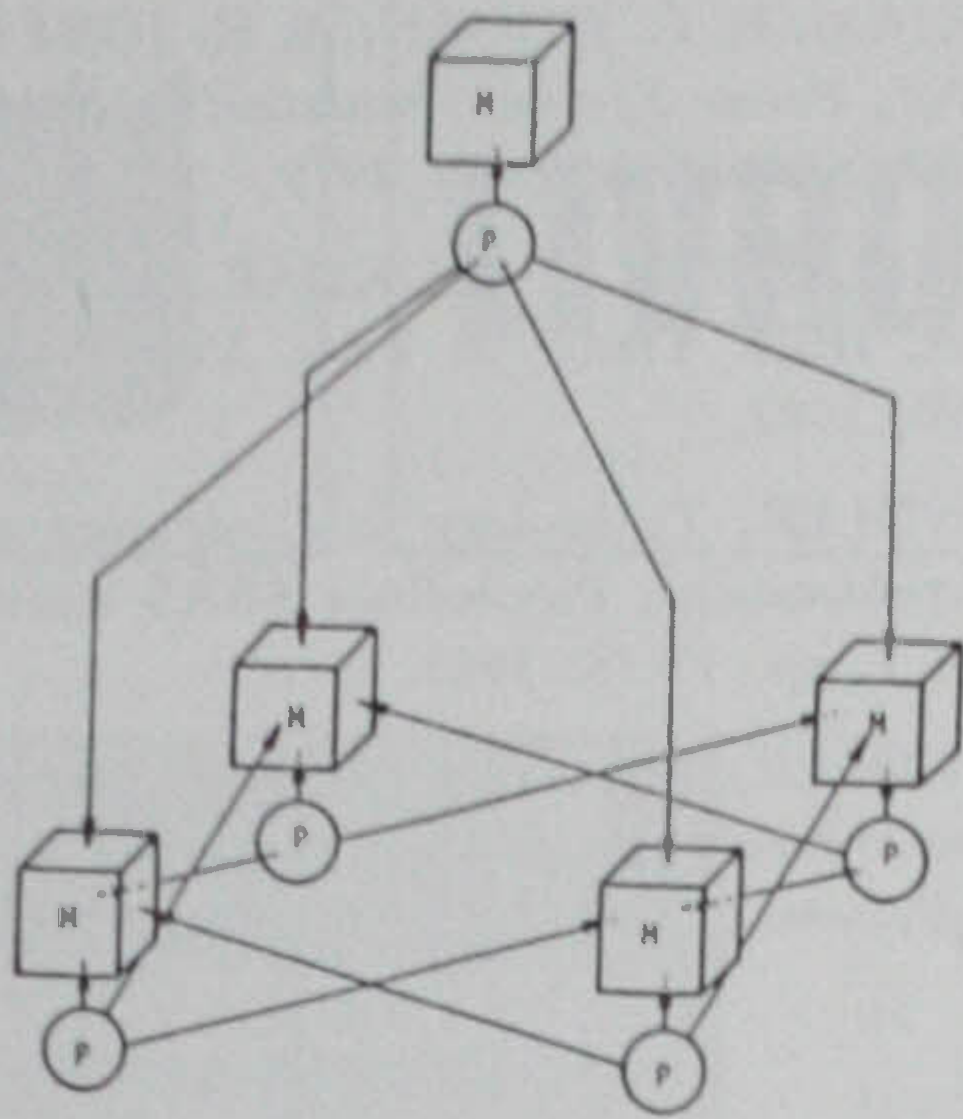


Fig. 1 — Estrutura do Erlangen General Purpose Array

rafamento e aumentando a fiabilidade.

O conjunto de 5 blocos foi implementado na Universidade de Erlangen — Nuremberga, consistindo cada bloco em:

- um processador AEG — TELEFUNKEN 80-60
- uma unidade de memória
- um «multiport» associado à memória.

Está prevista a construção de uma pirâmide com 85 processadores (64 no plano de trabalho).

Alguns trabalhos efectuados pelo autor confirmam a adequação desta estrutura à análise de SEE. A título de exemplo, indicam-se no quadro II os tempos de

QUADRO II

TEMPOS DE EXECUÇÃO (em segundos) CORRESPONDENTES À SIMULAÇÃO DO SISTEMA DA FIGURA 2 (100 ITERAÇÕES)

T_1 : 1 processador	T_5 : 5 processadores	Speed-up: T_1/T_5
197,96 s	53,65 s	3,7

execução obtidos em funcionamento sequencial (1 processador) e paralelo (5 processadores) relativos à resolução do problema seguinte. Seja dada uma cadeia L, C como a descrita na figura 2. Pretende-se simular, no domínio do tempo, a evolução do sistema (tensões em todos os nós) quando uma tensão contínua é aplicada. O sistema contém 100 nós, tendo sido utilizado o método das admitâncias diferenciais (derivado do método do trapézio). O factor 3,7 obtido com 5 processadores deve no entanto ser referido à área de trabalho, que contém apenas 4 processadores. Deste

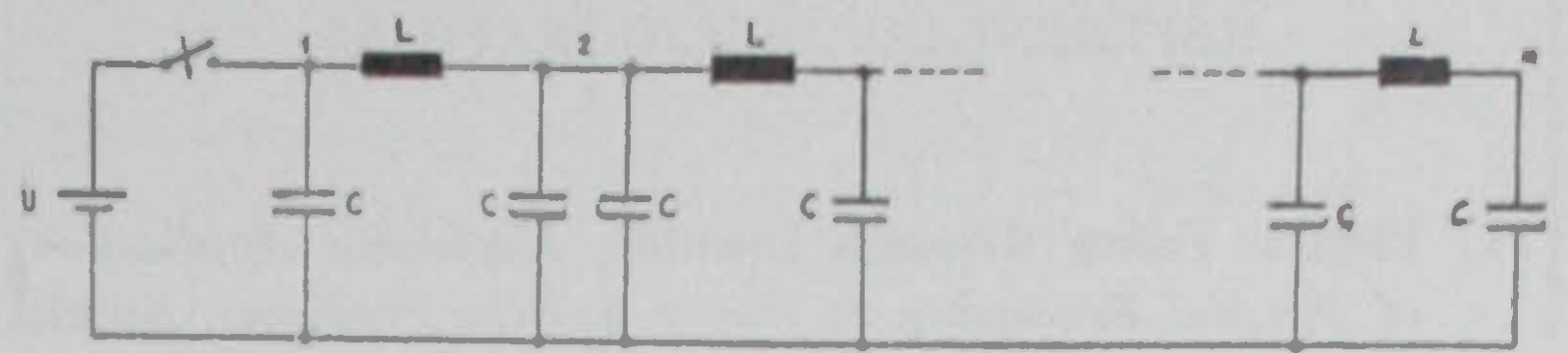


Fig. 2 — Cadeia L, C

modo, o «speed-up» obtido aproxima-se do valor óptimo 4. Com uma arquitectura deste tipo, onde estão praticamente ausentes problemas de sincronização e de troca de dados, a extrapolação dos resultados é relativamente simples: uma pirâmide com 21 processadores dispostos em 3 camadas seria capaz de simular uma rede com 200 nós no mesmo tempo ($50.16/4=200$.) Claro que existe uma dimensão crítica, abaixo da qual o processamento paralelo deixa de ter interesse, com este computador e com este algoritmo; nessa zona, deixam de ser válidas extrapolações lineares. Verifica-se também que o «speed-up» melhora à medida que aumenta a dimensão do circuito a estudar. Isto é vantajoso, porquanto os problemas reais de análise de SEE dizem respeito à simulação de redes eléctricas muito extensas.

Uma boa adequação dos algoritmos à estrutura do computador revela-se essencial na obtenção de bons resultados. Os bons resultados conseguidos com o EGPA devem-se não só à sua arquitectura, como também a uma correcta escolha dos métodos de resolução a adoptar. O binómio algoritmo/arquitectura, e o grau de adaptação dos dois termos, revela-se essencial na obtenção de rendimentos elevados.

4. Conclusão

Num futuro próximo, o analista de SEE terá à sua disposição um novo tipo de computador, construído segundo os princípios do processamento paralelo. É importante compreender o funcionamento e a estrutura dessas máquinas, para poder extrair delas a obtenção de rendimentos elevados.

O multiprocessador oferece as melhores perspectivas para a análise de SEE. A simulação deverá explorar o paralelismo intrínseco do SEE, esquecendo os métodos que em processamento sequencial deram bons resultados; os algoritmos devem moldar-se à arquitectura do multiprocessador, baseando-se se necessário em novos métodos de resolução. Esta atitude inovadora permite nomeadamente:

- simular sistemas de maior dimensão;
- simular sistemas dinâmicos num tempo mais próximo do tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Electric Power Research Institute, *Exploring Applications of Parallel Processing to Power System Problems*, Special Report EL — 566 — SR. 1977.
- [2] Electric Power Research Institute, *Technology Assessment Study of Near Term Computer Capabilities and their Impact on Power and Stability Simulation Programs*, Final Report EL — 946. 1978.
- [3] K. SCHMIDT, W. LEONHARD, *Simulation of Electric Power Systems by Parallel Computation*, 12. Anu. Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation. 1981.
- [4] I. DUSHAM, R. C. DUGAN, A. K. JONES, S. N. TALUKDAR, *Power System Simulation on a Multiprocessor*, IEEE PES Summer Meeting, 1979.
- [5] J. GROSSER, S. N. TALUKDAR, *Models for MIMD Machines*, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, N.º 1, pp. 94-99, 1982.
- [6] W. HÄNDLER, *Technology in Computing and Architectural Considerations*, Proceedings SEAS Anniversary Meeting, Vol. 1, pp. 17-38. 1981.
- [7] W. HÄNDLER, *Innovative Computer Architecture How to Increase Parallelism but not Complexity*, Parallel Processing Systems, Cambridge University, Press, pp. 1-41, 1982.
-

AOS NOSSOS ASSINANTES

Electricidade

energia - electrónica

QUE AINDA NÃO LIQUIDARAM

A ASSINATURA DE 1984

AGRADECEMOS O ENVIO DE

CHEQUE OU VALE POSTAL NO VALOR

DE 900\$00 PARA

EMPRESA EDITORIAL ELECTROTÉCNICA EDEL, LDA.

Rua Dona Estefânia, 48-3.º Esq. — 1000 LISBOA