

전력계통의 무효전력 제어 및 안전도 평가를 위한
Asynchronous Team 이론의 적용에 관한 연구

A Study on the Application of Asynchronous Team Theory for QVC and
Security Assessment in a Power System

김 두 현* · 김 상 철**

Doo-Hyun Kim · Sang-Chul Kim

(1997년 4월 7일 접수, 1997년 9월 5일 채택)

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of Asynchronous Team(A-Team) theory for QVC (Reactive power control) and security assessment in a power system. Reactive power control problem is the one of optimally establishing voltage level given reactive power sources, which is very important problem to supply the demand without interruption and needs methods to alleviate a bus voltage limit violation more quickly. It can be formulated as a mixed-integer linear programming(MILP) problem without deteriorating of solution accuracy to a certain extent. The security assessment is to estimate the relative robustness of the system and deterministic approach based on AC load flow calculations is adopted to assess it, especially voltage security. A distance measure, as a measurement for voltage security, is introduced. In order to analyze the above two problem, reactive power control and static security assessment, in an integrated fashion, a new organizational structure, called an A-team, is adopted. An A-team is well-suited to the development of computer-based, multi-agent systems for operation of large-scaled power systems. In order to verify the usefulness of the suggested scheme herein, modified IEEE 30 bus system is employed as a sample system. The results of a case study are also presented.

* 충북대학교 공과대학 안전공학과

** 세명대학교 공과대학 산업안전공학과

1. 서 론

전력계통의 안정적이고 효율적인 운전을 위한 무효전력과 계통안전도에 관한 문제는 수학적 알고리즘을 이용한 방법과 인공지능 이론을 이용한 연구방법의 두가지로 대별된다. 지속적인 부하의 증가에 따른 송전용량의 증가가 이루어지고 있지 않고, 전력에너지의 효과적인 이용을 위한 계통의 연계등으로 인하여 이 문제는 매우 어려운 국면에 처하고 있으며, 전력계통이 대형화 및 복잡화되어 감에 따라 무효전력/전압 문제가 발생한 순간에 계통운용자가 타당한 의사결정을 내리는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 측면에서 계통운용자의 의사결정을 보조하기 위한 필요성이 절실히 요구되어 수학적인 알고리즘이 이용되고 있으나^{1,2)} 이는 변수의 다양성 및 이산성으로 인하여 그 한계를 극복하지 못하고 있다. 또한 계통의 안전도는 그 의미를 이해하기는 쉬우나 정확하게 정의하기는 어려운 직관적인 개념이다. 전력계통의 운용에 있어서 안전도 평가의 목표라면 계통의 안전도를 개선하기 위한 조치가 요구되는 시점에서 어떠한 조치가 취해져야 하는지에 대한 충분한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 이러한 안전도 평가에 대한 기본적인 개념은 Dy Liacco³⁾의 골격에 기초하고 있다. 기존의 안전도 평가를 위한 연구에서는 수리적인 알고리즘이 주로 이용되어 왔으며 이는 계통에 대한 효과를 모의하는 때에는 충분하나 그 결과를 분석하고 해석하는 때에는 미흡하여 계통운용자의 의사결정에 충분한 도움을 주지 못하는 결과를 초래한다. 이러한 단점은 인공지능 기법을 이용한 지능형 프로그램과의 결합으로 해결될 수 있다.

무효전력제어와 안전도 평가를 위해 인공지능의 이론을 도입한 연구는 수년전부터 활발하게 전개되어 그동안 좋은 결과를 제시하고 있다. 대표적인 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Liu에 의해 1986년에 처음으로 이 분야의 체계적인 연구가 발표되었는데, 주어진 문제를 해결하기 위해 필요한 지식들을 표현하는데 If-Then구조의 규칙을 사용하였으며 전진추론 메커니즘을 갖는 OPS-5 언어를 사용하였고, 매우 심각한 전압 이상이 발생되었을 때에는 선형계획법을 이용하여 문제를 해결하고자 하였다⁴⁾. 1989년도에 William

은 국부적인 계통정보만을 이용한 무효전력/전압을 제어하기 위하여 계통분할법을 도입하였으며, 이 방법은 예기치 못한 사고로 인해 전체 계통의 정보를 얻을 수 없는 경우에 있어서 매우 효과적이라 할 수 있다⁵⁾. 또, Zhang에 의해 1989년도에 발표된 논문은 각종 제어변수에 대한 의사결정 속도를 증가시키기 위하여 패턴 인식기법을 도입하여 실제 응용 가능성을 한층 더 높였다⁶⁾. 이러한 인공지능 기법을 도입한 기존의 연구들은 무효전력/전압 제어 문제를 좀 더 실질적으로 해결할 수 있는 가능성을 보였다. 계통의 안전성을 달성하기 위해서는 계통정보의 수집, 평가, 적절한 제어 동작의 실행 및 이에 관한 정식화가 필요하다 생각하여 최적화기법과 같은 수학적 알고리즘을 이용한 프로그램의 개발에 관련된 연구가 진행되어 왔다⁷⁾. 또한 결정론적 방법론에 기초한 앞의 방법과는 달리 외란과 부하수요에 대한 확률적 변화에 대한 개념을 도입한 확률적 방법론에 입각한 연구도 수행되었다⁸⁾. 이러한 수학적 알고리즘에 입각한 방법론에 대한 한계를 극복하기 위한 방법으로 최근 계통 안전성제어 및 평가에 대한 인공지능 기법을 도입한 연구가 활발하게 수행되어 오고 있다. 1988년에 S. N. Talukdar는 기존의 수리적 프로그램에 전문가 시스템 기법을 접목한 기초 연구를 수행하여 EMS와의 연계에 대한 가능성을 제시하였다⁹⁾. 1990년에는 OPS-5와 FORTRAN 언어를 이용하여 서부 펜실베니아 전력회사의 실제 계통에 적용 가능한 연구가 S. N. Talukdar에 의하여 이루어져 왔다¹⁰⁾.

그러나 이러한 연구를 통하여 다양한 언어를 사용하여 개발된 컴퓨터 프로그램(computer-based agent)간의 공존 및 상호 보안을 통하여 계통운영자의 요구에 필요한 정보를 적시에 제공할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다. 이를 위해서 하나의 운용시스템에서 보다 효율적으로 필요한 프로그램을 이용하기 위해서는 기존의 조직체계를 대신할 수 있는 새로운 조직체계가 요구된다. 현재의 운용시스템은 감독자(supervisor)의 역할을 담당하는 프로그램이 존재하는 계층구조(hierarchical structure) 형태의 조직기법을 사용하고 있다. 이러한 조직기법하에서는 새로운 기능을 갖거나 다른 컴퓨터 언어로 작성된 프로그램이 설치되어야 하는 경우 전체 운용시스템의 체계를 수정해야 한

다. 즉 시스템의 개방성(openness)이 매우 결여되어 있는 조직기법이다. 이러한 단점을 탈피하기 위하여 일종의 비계층적구조(non-hierarchical structure; heterarchical structure)를 갖는 조직기법인 Asynchronous-Team (A-Team)^{11~14)} 이론을 이용한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 전력계통의 동특성의 일부는 수학적 알고리즘으로 모델링하고 경험적 지식의 표현에 따른 문제점을 보완할 수 있는 프로그램을 개발하며 최적의 상태에서 계통조작자의 의사결정을 지원하기 위하여 A-Team 이론의 조직기법을 적용하고자 한다. 비계층적 구조의 조직기법을 적용한 경우에는 이미 개발되어 있는 프로그램들간의 효과적인 협조운용을 통하여 주어진 상황에서 가장 적합한 결론을 가져올 수 있는 프로그램의 선정이 가능하며, 개개의 프로그램 능력의 한계를 벗어나 기존의 계층적 구조에서는 해결할 수 없는 문제도 프로그램간의 자치적(autonomous) 연계를 통하여 해결할 수 있다. 또한 최적으로 제시된 해가 적용 불가능한 경우에도 메모리에 기억되어 있는 준최적의 해를 사용함으로써 문제해결을 위한 다양성을 확보할 수 있다.

2. 무효전력 제어 및 안전도 평가

2.1 무효전력 제어 MILP

전력계통의 운용 목표중 하나는 수요자에게 정전없는 전기에너지를 공급하는 것이다. 1960년대 후반부터 무효전력 제어 및 신뢰도 평가 분야에 대한 이론 개발과 연구가 활발하게 행하여져 왔으나, 변수의 이산성, 비선형성, 결정변수의 다양성, 변수간의 상호작용, 수리모형화의 취약성 등으로 인하여 대형계통의 운전을 위한 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있다. 일반적인 무효전력 제어문제를 정식화함에 있어서 X 를 상태변수, U 를 제어변수라 할 때 식(1)로 표시 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{Min } f(X, U) \dots\dots\dots (1) \\ \text{s.t. } g(X, U) = 0 \\ h(X, U) \leq 0 \end{aligned}$$

전력계통의 무효전력설비의 특성상 제어변수는 연속변수와 이산변수로 구성되어 있으므로 변수의 이산성으로 인한 문제의 복잡성을 해소하기 위하

여 공학적인 측면에서 해의 정밀도를 해치지 않은 범위내에서 연속변수로 모델링하여 문제를 해석해 왔다. 그러나 본 연구에서는 변압기탭을 이산변수로 취급하고 나머지 변수들을 연속변수로 취급하는 혼합정수계획 문제로 수식화 하였다. 무효전력 발전량, 전압치, 선로조류 및 다른 무효전력장치에 대한 제약조건하에서 최적의 전압을 유지하는 문제로써, MILP(Mixed Integer Linear Programming) 문제로 수식화하면 식(2)와 같다²⁾.

$$\begin{aligned} \text{Min } C_1 \cdot U_1 + C_2 \cdot U_2 \dots\dots\dots (2) \\ \text{s.t. } A \cdot U_1 + B \cdot U_2 = w \\ D \cdot U_1 + E \cdot U_2 \leq z \end{aligned}$$

U_1 는 연속변수로, U_2 는 정수 값만을 가질 수 있는 이산변수로 모델링되며 Land and Doig 방법^{15,16)}을 도입하여 개발한 MILP 프로그램을 이용하여 최적해를 계산한다.

2.2 안전도 평가

전력계통에서의 안전도를 평가하는 방법은 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분할 수 있다. 전자는 전력조류계산에 입각하여 계통에서의 일어날 수 있는 모든 사고를 해석한 후(상정사고해석)에 이들 결과에 대한 평가를 수행하고 계통의 안전도를 유지하기 위하여 적당한 대비책을 제시하는 것이다. 후자는 계통 구성요소의 비계획적 사고발생율을 정량적으로 평가하여 얻어진 사고확율을 이용하여 평가하는 방법으로 각 사고의 서로 다른 발생가능성을 고려하지 않는 전자에 의한 평가보다 일관된 평가를 내릴 수 있다. 그러나 전자에 의한 평가 결과는 계통의 안전도를 파괴하는 사고를 정확하게 진단할 수 있으므로 본 연구에서는 전자의 방법에 의한 안전도 평가를 수행한다.

계통의 안전도를 평가하는 기본형태는 계통의 각 구성요소에 대한 상하한치에 입각한 Dy Liacco의 방법을 보완한 Fink와 Carlsen에 의하여 정상상태(normal state), 경계상태(alert state), 비상상태(emergency state), 복구상태(restorative state), 극단상태(in-extremis state)로 계통상태가 정의된다. 이들 상태간의 관계를 나타내면 Fig. 1과 같다¹⁷⁾.

계통의 무효전력제어 문제는 각 모선에서의 전압을 일정 수준으로 유지하는 문제이므로 모선전압의 분포에 따른 전압안전도에 대한 평가가 이부

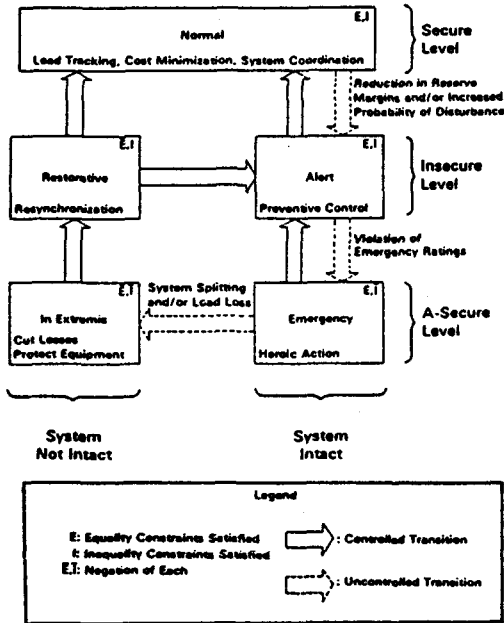


Fig. 1 Relationship among power system states for security analysis

여겨야 한다. 계통의 전압분포에 따른 계통의 거동에 대한 해석은 아직까지 잘 알려져 있지 않으며, 전압안전도를 평가하는 해석적 기법도 개발되어 있지 않으며 조류계산의 발산 여부를 하나의 지표로 간주하고 있다. 본 연구에서는 계통의 전압이 안전도 문제를 식(3)의 거리척도(distance measure)를 도입하여 평가한다.

$$M_{VS} = \sum_{i=1}^M W_i |V_i - V_i^{ulim}| + \sum_{j=1}^N W_j |V_j - V_j^{llim}| \dots\dots\dots (3)$$

여기서 M, N은 각각 전압의 상한치와 하한치를 벗어나는 모선의 수, W_i, W_j 는 위배모선 i, j의 중요도, V_i, V_j 는 위배모선 i, j의 전압, V_i^{ulim} 는 위배모선 i의 전압상한치, V_j^{llim} 는 위배모선 j의 전압하한치를 나타낸다.

3. A-Team^{11~14)}

3.1 조직체계와 A-Team

현재 사용되고 있는 컴퓨터 프로그램 (computer-based agent)은 개개의 프로그램의 문제

해결 능력에 제한이 있으며 이러한 제한을 초월하는 능력이 요구되는 문제가 존재한다. 또, 주어진 문제를 해결하기 위하여 하나의 일관된 방법으로 접근을 하지 않는 행위자(agent: program)들은 서로 부작용을 초래하기도 한다. 이러한 경우에 프로그램을 관리하는 조직체계의 특성에 의하여 여러개의 프로그램으로 구성된 시스템이 구비할 수 있는 문제해결 능력이 결정되어진다. 조직체계는 공동의 목적을 갖는 행위자들의 집합에서 각각의 요소가 가지고 있는 최대의 능력을 발휘할 수 있도록 계획되어야 한다고 말할 수 있다. 이러한 조직체계에는 계층적 조직(hierarchical organization)과 비계층적 조직(non-hierarchical organization)으로 나누어진다. 계층적 조직에서는 각층이 아래층을 제어하는 다수의 층으로 구성된 형태를 띄며 감독자(supervisor: 최상위 프로그램 또는 오퍼레이터)가 존재하며, 주어진 문제를 해석하기 위한 각 단계에 대한 수행명령 및 방법이 감독자로부터 아래층으로 전달된다. 현재의 전력계통을 제어하기 위하여 다양한 컴퓨터 프로그램들로 구성되어 있는 운용시스템은 모두 이 계층적 구조에 의하여 조직되어 있다. 이러한 경우에는 새로운 프로그램이 개발 되었을 때 감독자의 허락없이 운용시스템에 설치될 수 없다. 또한 이 프로그램이 아주 새로운 형태인 경우에는 감독자에게 새로운 기술을 획득시켜야 하는 번거로움이 있다(supervisory overhead). 또한 감독자에 의해 비효율적인 결정이 내려진 경우에는 그 효과는 계속해서 전파되며, 그러한 감독자를 제거하는 경우에는 결국 전체 시스템의 붕괴를 가져온다(fragility). 그러나 비계층구조를 사용한 시스템인 경우는 그 양상이 매우 다르다. 감독자가 존재하지 않는 단층구조로 형성되어 있어서 문제를 해석하기 위한 각 단계는 개개의 행위자에 새겨져 있다. 이 경우에 각 행위자간의 공통의식의 결여내지는 상충으로 주어진 문제를 해결할 수 있는 능력이 계층구조보다 떨어질 수도 있다(inefficiency). 이 비계층구조는 계층구조에 익숙해져 있는 시스템에서는 아주 이해하기 힘든 면도 있다(strangeness). 결국 많은 수의 컴퓨터 프로그램으로 구성되어 있는 시스템을 효율적으로 구성하여 문제를 해결하기 위한 조직기법은 supervisory overhead와 fragility를 갖는 계층적조직법과 strangeness와 inefficiency를 갖는 비계

층적 조직법으로 특징지어진다. 다수의 행위자가 있고 해결해야 할 다수의 임무(task)가 주어진 경우에 이 임무들을 효율적으로 처리하기 위한 시스템을 구축할 때 계층적 조직법으로는 불가능하다. 왜냐하면 각각의 임무에 따라 감독자에게 새로운 풀이방법을 입력시켜야 하며 이를 위해서는 상당한 노력이 요구되기 때문이다. 각 임무에 대하여 신속성있게 해결하기 위한 최소한의 행위자로 구성된 시스템의 구축을 위해서는 새로운 행위자의 설치 및 제거가 용이하여야 하며(openness), 구축된 시스템은 개개의 임무를 효과적으로 수행할 수 있어야 한다(effectiveness). 개방성(openness)과 효율성(effectiveness)은 비계층적구조에서만 가능하며 한 행위자의 출력이 다음 행위자의 입력이 되는 직렬구조와 행위자들이 데이터를 읽어내고 써 넣을 수 있는 하나의 메모리같은 최소회로망(minimal network)에 의해 제어되는 간단한 형태에 의해 달성된다. 개방성과 효율성을 최대로 보장할 수 있는 조직기법이 A-Team이다. A-Team은 메모리와 여러개의 행위자로 구성된 회로망으로 생각할 수 있으며 절점(node)이 메모리를, 호(arc)가 행위자를 나타내는 방향성그래프인 Data Flow(Fig. 2)와 절점이 행위자를, 호가 행위자들 간의 관리관계를 나타내는 방향성그래프인 Control Flow(Fig. 3)로 편리하게 나타낼 수 있다.

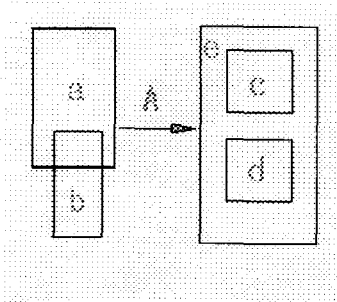


Fig. 2 A data flow signifying that agent-A reads from memory-a and writes to memory-e. Also, a has an intersection with b, and e includes c and d

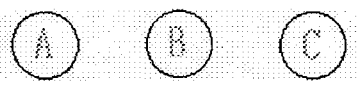


Fig. 3 A control flow signifying that agents A, B and C have no supervisory relations

3.2 A-Team의 특징

각 행위자가 다른 행위자에 의하여 지연되는 일이 없이 동작하는 경우에 그 행위자는 비동기적(asynchronous)으로 동작한다는 의미이다. 즉 하나의 행위자가 동작하기 위하여 필요한 입력을 다른 행위자가 제공할 때까지 기다리지 않는다는 것이다. 기존의 프로그램들로 구성된 계통운용 시스템에서는 하나의 프로그램 패키지를 실행하여 어떤 결과를 얻기 위해서는 반드시 다른 패키지의 결과를 기다린 다음 그 출력을 입력으로 사용하고 있다. 즉 동기적(synchronous)으로 동작한다. 모든 행위자들이 비동기적으로 동작한다는 것은 병렬처리를 의미한다.

A-Team의 특징을 요약하면 다음과 같다.

Autonomous agent : 각각의 행위자는 입력선택이나 scheduling을 독립적으로 처리한다.

Asynchronous communication : 행위자들은 공유 메모리를 통하여 필요한 정보교환을 시스템내의 동기화없이 처리한다. 즉 각 행위자들로 하여금 다른 행위자의 동작상태 여부에 관계없이 독립적으로 데이터를 읽고 쓰는 동작을 실행함으로써 병렬연산을 구현한다.

Open organization : 각 행위자들은 서로서로 독자적으로 실행되기 때문에 새로운 행위자의 첨가나 필요없는 행위자의 삭제시에 남아있는 행위자에게 알려줄 필요가 없이 언제나 자유롭다.

Cyclic data flow : 공유메모리에 저장되어 있는 자료를 피드백이나 반복을 통하여 수정하거나 대체할 수 있어 보다 나은 해를 항상 기억한다.

이러한 특징을 갖는 A-Team 이론을 전력계통에 적용하는 연구를 통하여 계통의 효율적 운용에 의한 전력에너지의 안정적 공급이 가능하며 또한 기존의 EMS 시스템과 새로운 지능형 프로그램 시스템을 효율적으로 결합하는 것이 가능하다^{18,19)}. 현재의 복잡한 전력계통의 감시 및 제어에 사용되고 있는 에너지관리시스템(EMS)에서 온라인 안전도 평가 및 분석을 위한 수리적 알고리즘에 기반을 두고 있는 프로그램의 한계성으로 인하여 지능형 프로그램으로의 대체가 필요하다. 기존의 대부분의 EMS용 컴퓨터와 지능용 프로그램 시스템을 결합하고자 할 때 EMS용 컴퓨터에 직접 결합하는 경우는 일반 프로그램과의 결합과는 달리 많은 문제점을 내포하고 있다⁹⁾. EMS용 컴퓨터를 이용

하여 결합하는 경우 일반적으로 EMS용 컴퓨터는 인공지능용 언어를 제공하지 못하며, CPU 공유 문제 및 유지보수 문제등의 단점이 존재한다. 또 별개의 컴퓨터를 이용하는 경우에는 전력계통 자료, 응용 프로그램 및 MMI를 공동으로 사용할 수 없다는 결함을 내포하게 된다. 이런경우에 독립적이고, 비동기적으로 병렬처리가 가능한 비계층구조의 조직적기법인 A-Team을 도입하면 이들 프로그램들을 하나의 운영시스템안에서 효과적으로 사용할 수 있다.

4. A-Team을 이용한 무효전력제어 및 안전도 평가

A-Team의 특성인 개방성으로 인하여 A-Team 내에는 많은 수의 행위자가 존재하며 전문가시스템의 규칙처럼 계속해서 증가시킬 수 있다. 각 알고리즘을 하나의 독립적 행위자로 구현하기 위하여 각 알고리즘은 언제 동작하며, 어떤 입력을 선택하고 어떤 출력을 제공해야하는 지에 대한 선택을 할 수 있어야 한다. 이러한 기능은 거의 모든 알고리즘의 개발 초기나 말기에 삽입 가능하다. 무효전력 제어 및 안전도 평가를 위한 A-Team 구성에 필요한 행위자중 중요하다고 인정되는 것을 나열하면 다음과 같다.

Data Acquisitioner(DA) : 전력계통의 최근 정보를 수집

Random Initializer(RI) : A-Team의 초기치 제공

Contingency Generator(CG) : 사고를 상정하고 그 효과를 분석함

Loadflow Calculator(LC) : 계통상태에 관한 정보획득을 위해 전력조류계산 시행

Creator(CT) : MILP를 이용하여 해를 구함

Security Assessor(SA) : Fink와 Carlsen에 기반을 두고 계통안전도를 평가함

Result Reporter(RR) : 결과를 사용자에게 보고함

Destroyer(DT) : 선형확률분포를 이용하여 불필요한 해를 제거함

상기의 행위자들을 이용한 A-Team은 하나의 메모리에는 계통자료와 초기해가 들어 있으며, 다른 메모리에는 개선된 해와 안전도 평가 결과등이 들어 있는 2개의 메모리를 갖는 구조로 구현할 수 있

다. A-Team이 동작하기 위한 초기해는 RI에 의하여 제공되며 CT에 의하여 나온 해가 만들어진다. 기준에 의하여 불필요하다고 인정되는 해는 DT에 의하여 메모리에서 제거되는 등 각각 병렬로 연산되는 행위자에 의하여 메모리내의 값들은 수시로 수정이 된다. 본 연구에서 구현하고자 하는 A-Team의 개략적인 구조는 Fig. 4와 같으며, server/client 구조의 형태로 client가 행위자로서 작용하고 메모리는 server로서의 기능을 갖는다.

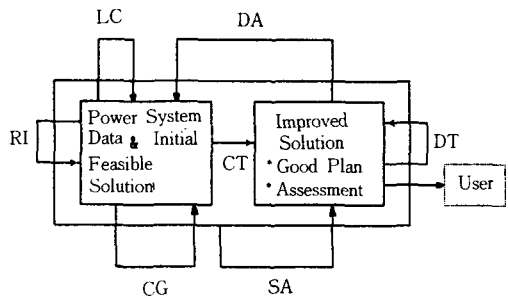


Fig. 4 Structure of an A-Team for Reactive Power Control/Security Assessment

5. 사례연구

Asynchronous Team 이론을 적용하여 전력계통의 무효전력제어 및 안전도평가 문제를 해결함에 있어서 본 연구에서 제시한 방법의 효용성을 검증하기 위하여 IEEE30모선 계통을 사례연구 대상계통으로 선정하였다. 본 계통의 구성 단선도는 Fig. 5와 같으며 30개의 모선과 41개의 선로, 6대의 발전기(1, 2, 5, 8, 11, 13번 모선), 4대의 변압기로 구성되어 있다. 또 5개의 모선(17, 19, 21, 26, 30번)에 커패시터 뱅크가 설치되어 있으며, 리액터도 5개의 모선(9, 15, 17, 23, 27번)에 시설되어 있다. 35번 선로에 사고가 발생한 경우의 계통상태를 상정사고 해석기법을 도입하여 해석하였다. 각 모선의 전압분포를 사고전의 전압분포와 비교하면 Fig. 6과 같다. 35번 선로사고에서 가장 심각한 전압문제를 나타낸 모선인 26번 모선의 전압은 0.914(p.u. Value)로 계산되었으며, 이는 하한치인 0.95보다 낮은 값이다. 또 24번과 25번 모선의 전압도 각각 0.949, 0.933으로 전압하한치를 벗어나 전압문제를 야기하고 있다. 계통의 전압안

전도를 식(3)의 거리척도를 도입하여 평가하면, $M_{VS}=0.054$ 를 나타내며, 부등호 제약조건 위반에 의한 비상상태(emergency state)하에서 계통이 운전되고 있음을 의미한다. 이 전압문제를 해소하기 위한 방법으로 5개의 해결책이 A-Team의 메모리에 저장되어 있다. 이 5개의 해중에서 하나(해 1)를 제시하면 Table 1과 같다. Table 1에서 모선번호는 발전기 모선, 커패시터 설치 모선, 리액터 설치모선중의 하나를 나타내며, 무효전력량은 각기 그 모선에서 운용되어야 할 무효전력량(Mvar)을 나타낸다. A-Team 이론을 적용할 때의 장점으로는 가장 적절한 해를 적용할 수 없는 경우 차선책으로서 메모리에 저장되어 있는 해를 선택할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 메모리에 5개의 해결책이 기억될 수 있게 하였으며 계통에 설비되어

Table 1 VARs Suggested in Solution 1

모선번호	무효전력량	모선번호	무효전력량
2	8.6	13	10.0
5	24.0	19	8.7
8	14.2	21	6.8
9	-2.2	26	3.6
11	1.8	30	3.9

Table 2 Solutions Suggested for the Voltage Problem(Transformer Tap Only)

variable	initial	solution 1	solution 2	solution 3	solution 4	solution 5
Tr.1	1.0000	0.9875	0.9875	1.0000	0.9875	0.9750
Tr.2	1.0000	0.9875	1.0000	1.0125	1.0250	1.0125
Tr.3	1.0250	1.0125	1.0000	1.0125	1.0000	1.0000
Tr.4	1.0250	1.0125	1.0125	1.0125	1.0000	1.0000
운전비용 [\$/hr]	936.8750	935.4320	935.3528	935.3187	935.3087	935.2694

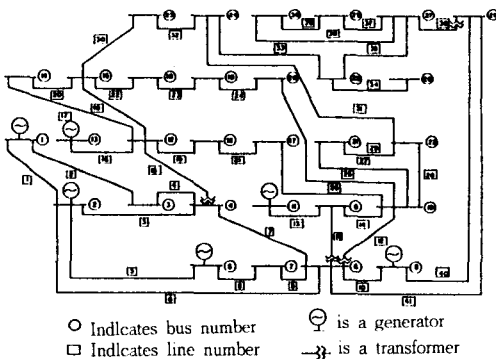


Fig. 5 One Line Diagram of IEEE 30 Bus System

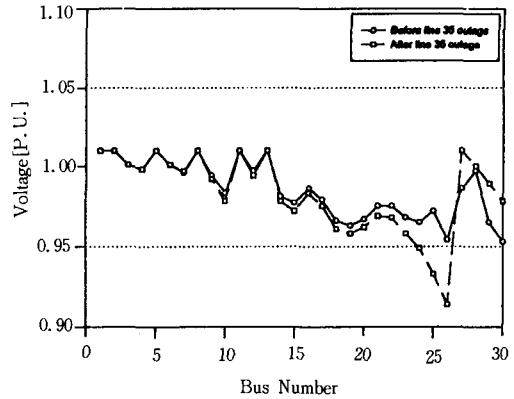


Fig. 6 Distribution of Bus Voltage in the System before and after Line 35 Outage

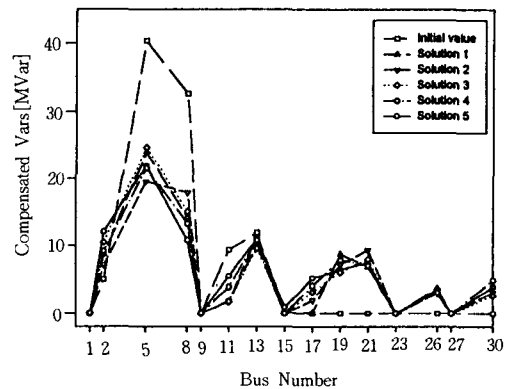


Fig. 7 Solutions Suggested for the Voltage Problem(Generators, Capacitors, Reactors)

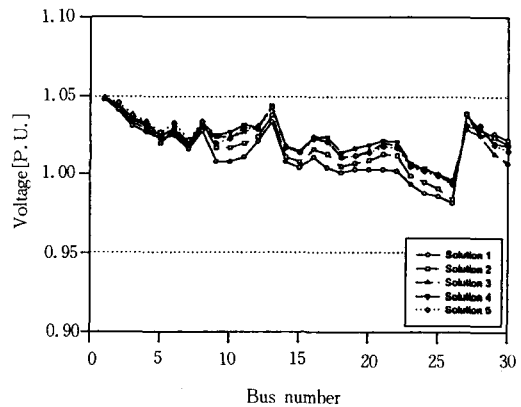


Fig. 8 Distribution of Bus Voltage by the application of the solutions

있는 무효전력량을 Fig. 7과 Table 2에 제시되어 있는 바와 같이 적절히 운용하면 정상상태로 복귀시킬 수 있다. Fig. 8에 Fig. 7과 Table 2에 제시된 무효전력량을 운용한 경우의 모선 전압분포를 나타내며, 전압분포가 정상상태를 유지하고 있다.

6. 결 론

국내에서도 전력계통의 자동화에 대한 관심이 고조되어 있으며, 따라서 계통운용시스템을 위한 새로운 프로그램의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 계통운용자에게 최적의 해 및 최선의 의사결정을 조인할 수 있는 시스템 개발에 필요한 새로운 비계층적 조직체계인 Asynchronous Team을 적용한 무효전력제어 및 안전도평가 프로그램을 개발하였다. 사례연구를 통하여 제안된 방법의 타당성과 효용성을 검토하였으며, 본 연구의 주요 특징을 제시하면 다음과 같다.

- 1) 전력계통의 안정적 운용에 필수적인 무효전력 제어 문제를 MILP 프로그램화 하였으며, 조류계산에 입각한 결정론적 방법을 이용한 안전도 평가를 수행하였다.
- 2) 계통운용자와 무효전력제어 프로그램, 안전도평가 프로그램 등 등의 컴퓨터 프로그램들을 효율적으로 관리하기 위한 조직공간(Organization Space), 부공간 및 이들 부공간에 최적으로 배치될 수 있는 멤버의 선택이 가능하도록 A-Team이라는 일종의 인공지능 이론을 도입하였다.
- 3) 사례연구를 통하여 본 연구방법의 타당성을 입증할 수 있었으며 전력계통의 통합관리를 위한 프로그램 비계층적 조직체계의 적용에 대한 가능성을 제시하였다. 그러나 실시간 제어나 대형 실계통의 원활한 관리 및 운용을 위해서는, 무한의 새로운 가능성을 갖고 있는 A-Team 이론에 대한 지속적인 연구 및 관심이 요구된다.

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1) J. Qiu, S.M. Shahidehpour, "A New

Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile", IEEE Vol. PWRS-2, No. 2, May 1987.

- 2) Y.M. Park, D.H. Kim, J.C. Kim, "Optimal Reactive Power And Voltage Control Using A New Matrix Decomposition Method", Transactions of KIEE, Vol. 39, No. 3, March 1990.
- 3) T.E. Dy Liacco, "The Adaptive Reliability Control System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-86, No. 5, pp. 517~531, May 1967.
- 4) C.C. Liu, K. Tomsovic, "An Expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power/Voltage Control", IEEE Vol. PWRS-1, No. 3, August 1986.
- 5) William R. Wagner, Ali Keyhani, Shangyou Hao, Tai C. Wong, "A Rule-Based Approach to Decentralized Voltage Control", PICA Conference, 1989.
- 6) X.R. Zhang, Y.S. Hai, "On-Line Decision-Making of Reactive Power Voltage Optimal Control Using Artificial Intelligence Approach", Preprints of IFAC Symposium on Power Systems and Power Plant Control, Seoul, Korea, August 1989.
- 7) S.A. Farghal, M.A. Tantawy, et al, "Fast Technique for Power System Security Assessment Using Sensitivity Parameters of Linear Programming, Security Assessment", IEEE Transactions on PAS, VOL-103, No. 5, pp. 946~953, May 1984.
- 8) Felix F.Wu, Yu-Kun Tsai, Yi-Xin Yu, "Probabilistic Steady-state and Dynamic Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, PWRS-3, No. 1, pp. 272~277, Feb. 1988.
- 9) Sarosh N. Talukdar, Richard D. Christie, "Expert Systems for On Line Security Assessment-A Preliminary Design", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 654~659, May 1988.
- 10) Sarosh N. Talukdar, Richard D. Christie,

- James C. Nixon, "CQR : A Hybrid Expert System for Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1503~1509, Nov. 1990.
- 11) S.N. Talukdar, "Designing Super-Agents", Workshop on Computational Organization Design, AAAI spring symposium series, Stanford, March 1994.
 - 12) S.N. Talukdar, P.S. DeSouza and S. Murthy, "Organizations for Computer-Based Agents", International Journal of Engineering Intelligent Systems, Vol. 1, No. 2, Sept. 1993.
 - 13) S.N. Talukdar and P.S. DeSouza, "Insects, Fish and Computer-Based Agents", Systems and Control Theory for Power Systems, Institute for Mathematics and its Applications, Vol. 64, Springer-Verlag, 1994.
 - 14) P.S. DeSouza, "Asynchronous Organizations for Multi-Algorithm Problems", Ph.D. Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, 1993.
 - 15) Hamdy A. Taha, "Integer Programming-Theory, Application, and Computations", Academic Press, 1975.
 - 16) Harvey M. Salkim and Kamlesh Mathur, "Foundations of Integer Programming", North-Holland, 1989.
 - 17) L.H. Fink, K. Carlsen, "Operating under Stress and Strain", IEEE Spectrum, Vol. 15, No. 3, March 1978.
 - 18) B.F. Wollenberg, "Reinventing EMS/SCADA and DA/DSM", NSF Symposium on Electric Power Systems Infrastructure, Washington, October 1994.
 - 19) S.N. Talukdar, E. Cardozo, "A Distributed Control Strategy for Energy Management Centers", EDRC Report, Carnegie Mellon University, 1989.