

QSS 해석 기법을 이용한 Voltage Security Assessment(VSA) 프로그램 기반설계

허진 이상호 김태현 문영환
한국전기연구원

Framework Design of Voltage Security Assessment(VSA) using QSS Analysis method

Hur Jin Lee Sang-Ho Kim Tae-Hyun Moon Young-Hwan
KERI(Korea Electro-technology Research Institute)

Abstract - Security problem has been a fundamental issue in the operation and planning of power system. Voltage instability is widely recognized as an important issue of power system blackout. As far as real-time operation is concerned, there is a need for appropriate tools to identify dangerous contingencies, assess security margins and suggest corrective actions. In this paper, we propose the framework design of Voltage Security Assessment(VSA) using QSS(Quasi Steady-State) analysis method in order to implement fast time domain simulation engine as a major part of VSA.

인 전압안정도 해석에 관한 활발한 연구를 진행하고 있다. 상용화된 프로그램으로는 캐나다 Powertec사의 DSA 프로그램에 VSA 모듈이 구현되어 실제 EMS와의 연계를 통한 적용과 검토가 이루어지고 있다.

본 연구원에서는 국내 전력계통의 안정적이며 최적의 운영을 위해 온라인 KERI-DSA(Dynamic Security Assessment) 프로그램 개발을 작년부터 시작하여 연구를 진행하고 있다. 따라서 본 논문에서는 KERI-DSA의 여러 모듈 중에서 VSA의 Fast Time Domain 엔진 구현을 위해 QSS 개념 및 적용을 살펴보고 QSS 해석 기법을 이용한 KERI-VSA 프로그램의 기반설계(Framework Design)를 제시하고 한다.

1. 서 론

2003년 북미 지역 및 유럽 등에서 발생한 대정전 사태에서 알 수 있듯이 안전성이 사전에 충분히 검토된 계통 운영이라 할지라도 국지적인 계통 안정도 정책의 한계성이나 미처 예측하지 못한 상황의 발생에 따라 의도와는 전혀 다른 대규모 정전이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해서는 대규모 전력계통의 안정도에 대한 포괄적이고 실시간 측정 데이터에 근거한 감시가 필요하다. 또한, 수요 증가로 인한 계통의 혼잡 및 안정도 운전 한계에 근접한 계통 운영이 증가하고 있으며 이로 인한 대규모 정전 사태 발생의 개연성의 증가되고 있다. 최근에 계통이 복잡해짐에 따라 동적현상(dynamic phenomena)에 의한 제약이 증가하고 있기 때문에 안전도 제약과 동적특성을 고려하여 전압안정도 평가 및 해석을 수행해야 한다.

일반적으로 전압안정도는 정상상태(Steady-state) 방법을 적용한 조류계산으로 산정할 수 있다. 실제적으로 수많은 상정고장을 다루기 위해서는 정상상태 방법이 가장 실용적이다. 그러나, 계통의 제어조치가 때때로 안정도 한계에 영향을 미칠 수 있다. 미분방정식을 이용한 Full time domain(FTD) 시뮬레이션은 외란(사고)에 따라 계통의 가장 정확한 시간응답특성을 제공하지만 전압안정도 시뮬레이션의 경우, 실제 수백초의 시간을 필요로 하며 온라인(on-line) 사용의 경우 시뮬레이션 유형에 따라 방대한 시간 소요를 필요로 한다. QSS(Quasi-Steady State) 기법을 이용한 Fast Time Domain 시뮬레이션과 같은 방법은 FTD 시뮬레이션보다 1000배 정도 빠르며 전압안정도에 중요한 제어효과를 얻을 수 있다. 온라인 안정도 해석의 실용화 현황을 살펴보면, 유럽공동으로 OMASES 프로젝트(전압안정도 및 과도안정도는 벨기에 Liege 대학에서 개발)[1]를 수행하여 그리스 HTSO(Hellenic Transmission System Operator) 시스템에 적용하였고 이탈리아 GRTN(Gestore Rete Transmission Nazionale)[2] 시스템에 적용 중이다. 이외에도 AVS(호주), CPE/EQTP(Iowa 주립대), VSA(Siemens), UWPFLOW(캐나다) 등이 있다. 특히, 벨기에 Liege 대학의 T. Van Cutsem 교수가 QSS 기법을 이용한 ASTRE 프로그램을 개발하여 온라인

2. QSS(Quasi Steady State) 기법 개요

전압안정도의 평가에 있어서 일반적으로 시간영역(time-domain) 시뮬레이션은 하나의 계통상태에 대해서도 많은 계산시간(5분 이상)이 소요되기 때문에 모든 상정고장으로 고려하는데 어려움이 있다. 실용적인 계산을 위해 각 계통상태에 대한 전압안정도 여유는 조류계산을 기본으로 계산한 후 몇 개의 선택된 위험한 상정사고에 대해서만 Time-domain 시뮬레이션을 수행하는 것이 효과적이다. 이러한 시간영역에서의 장기 전압안정도 해석 시뮬레이션을 위해 QSS 개념이 도입되었다.

2.1 QSS 모형개요

QSS 시뮬레이션은 장기 전압안정도 현상 분석에 적합한 모형이다. QSS 근사(approximation) 방법은 Time-scale decomposition에 의존하고 QSS 방법의 핵심은 전체 동특성을 대신해서 균형조건이 더 빠른 현상(Faster phenomena)을 나타낸다. 이러한 방법은 모델링의 복잡성을 줄여주고, 실시간 적용을 위한 제약을 만족하는 계산의 효율성을 제공한다. QSS 모델에 필요한 데이터 양은 일반적이며 데이터 수집, 검증, 유지관리 등은 중요 문제가 아니다. 세부적인 시간영역 모의에 따라 검증된 QSS 방법은 조류계산에 기본을 둔 단순한 방법보다 향상된 정확성과 풍부한 해석결과를 제공한다. QSS 근사에서는 동기발전기, 조속기, AVR의 단기 동특성은 3개의 비선형 수식[4]으로 표현된다. 이러한 비선형 수식은 발전기 포화특성, AVR 정상상태 이득, speed drop의 현상을 설명할 수 있다. 또한 이러한 비선형 방정식은 매 Time step에서 네트워크 방정식과 함께 해를 구할 수 있다.

2.2 QSS 시뮬레이션 및 특징

단기균형점(Short term equilibrium)이 안정하다는 가정으로 단기동특성(Short Transient) 미분방정식을 대수 방정식으로 표현한다. ASTRE 프로그램[3]의 경우, 아래 그림 1에서 볼 수 있듯이 매 10초 마다 단기균형점이 계산된다.

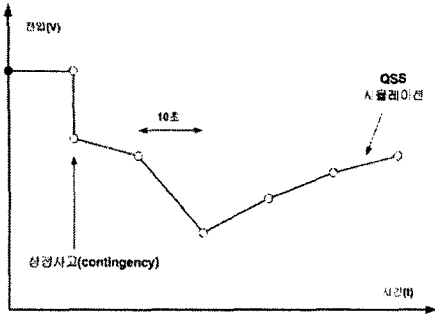


그림 1. ASTRE의 QSS 시뮬레이션

장기 전압안정도를 다룰 때, 몇 가지 사항(발전기, 발전기 regulator, 유도전동기, SVC, HVDC와 같은 단기 동특성(Transient))을 무시하고 계산 속도를 높이는 시뮬레이션을 수행한다. QSS 시뮬레이션은 엄청나게 빠른 속도를 구현하기 위해 단기 동특성을 장기 동특성에 초점을 맞추어 균형방정식(equilibrium equation)으로 대치하는 간단한 아이디어로 출발한다. 장기 동특성의 QSS 근사는 다음의 수식[4]으로 표현할 수 있다.

$$0 = g(y, x, zd, zc) \quad (1)$$

$$0 = f(y, x, zd, zc) \quad (2)$$

$$zd(k+1) = hd(y, x, zd, zc(k)) \quad (3)$$

$$z = hc(y, x, zd, zc) \quad (4)$$

식 (1)은 전력망에서 P(유효전력), Q(무효전력)의 Mismatch를 나타내고 y 벡터는 모션전압 크기와 위상각을 나타낸다. 식 (2)는 개념적으로 균형방정식에 해당하는 단기 동특성의 미분방정식을 나타낸다. 식 (3)은 제어기와 보호기기의 장기 특성을 나타낸다. Load Tap Changer 및 Switched shunt capacitor와 같은 기기는 Discrete 형태로 정확히 표현할 수 있다. 식 (4)는 일반적인 load recovery 모델을 나타내는 장기 미분방정식이다. 장기 시간영역에서 동작하는 제어기의 내부 제어 법칙(예, PID Law of load-frequency control)을 포함할 수 있다. QSS 기법은 안정도 해석시뮬레이션 시 고려하지 않은 단기 동특성이 안정하다는 가정에 의존한다. 따라서 다음의 특징을 갖는다.

- 전압 및 위상각 불안정(instability)과 같은 단기 불안정 시나리오를 고려하지 않음
- 장기 불안정이 단기 불안정을 유발하는 경우, 후자는 다시 산정하지 않음
- QSS 시뮬레이션이 안정하지만 단기 동특성이 불안정한 상황을 인지하지 않음

따라서, QSS 근사 기법은 장기 전압안정도 해석에 적합한 모형과 솔루션을 제공한다.

3. EDF-VSA 개발 사례

전력계통의 최적운동을 위해 안전도와 관련된 제어와 위험(risk)을 평가할 수 있는 프로그램의 활용 및 개발은 필수적이다. 이러한 사항을 고려하여 프랑스 EDF는 전력계통의 안정적이며 최적의 운영을 위해 Fast Time Domain 시뮬레이션 엔진을 기반으로 EDF-VSA[4]를 개발하였다. 본 논문에서는 EDF-VSA 개발 사례를 검토하여 국내 계통 적용을 위한 KERI-VSA 모델 개발을 위해 ASTRE 모형과 함께 Bench-marking system으로 활용하기 위해 사례검토를 수행하였다.

3.1 EDF-VSA 개요

계통이 복잡해짐에 따라 안전도 제약을 고려한 계통의 최적운영은 동특성(dynamic)과 전압안정도(Voltage Stability)를 고려해야 한다. 이러한 상황을 고려하여 프랑스 EDF는 안전도 관리 프로그램의 전반적인 재설계를 수행하였고 우선적으로 실시간 송전망 해석 프로그램인 GAMME를 개발하여 제어기관에서 활용중이며 1997년 이후 실시간으로 운영하고 있다. GAMME 프로그램은 정적안전도 모듈(상정고장 분석, automatic generation of topological remedial actions 등)로 구성되어 있다. 하지만, 전력계통은 동적현상(dynamic phenomena)에 의한 제약이 증가하고 있기 때문에 새로운 전압 안전도 평가 프로그램 개발을 착수하였고 기존의 GAMME 프레임워크에 통합하여 EDF-VSA를 개발하였다. EDF-VSA는 EDF의 송전망 안전도를 분석하는 것을 주요 목적으로 하고 있으며 주요기능으로는 전압안정도 현상의 시뮬레이션, 느린 동특성(Slow dynamics) 분석, 다양한 안전도 마진(security margins) 산정 그리고 수정조치(corrective actions) 제안 및 검토 등이 있다. EDF-VSA 개발의 주요 목적은 운영자에게 안전도 여유(margin)를 계산하게 하고 운영자가 다양한 운전제약을 고려하여 계통의 장기 동특성을 평가할 수 있는 기능을 제공하도록 프로그램을 개발하는 것이다. 이러한 프로그램은 온라인으로 동작(모니터링 되어야 함)해야 하고 특수하고 복잡한 계통상황을 정해진 시나리오 세트 로 표현하는 것이 필요하다. 또한, 운영자에게 위험성을 감지하게 하고 효과적인 조치를 내릴 수 있도록 해야 한다. 실시간 활용에 있어서 Shunt capacitor 스위칭, 발전기의 고속기동 그리고 OLTC blocking 또는 부하차단(load shedding)과 같은 수정조치(Corrective Actions)를 포함해야 한다.

3.2 EDF-VSA 모듈별 기능

EDF-VSA의 핵심은 장기 동특성 안전도(long-term dynamic security) 시뮬레이션 기능이며 Liege 대학과 공동으로 개발하였다. EDF-VSA는 모듈별 프로그램으로 구성되어 있으며 QSS(Quasi Steady State) 시뮬레이션이 핵심이다. 그림 2에 EDF VSA의 모듈별 구조를 나타낸다.

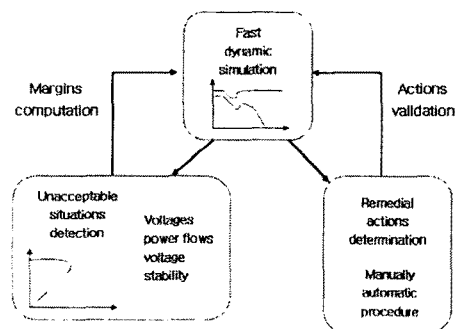


그림 2. EDF-VSA 모듈별 기능도

그림 2에서 볼 수 있듯이 QSS 엔진(Fast dynamic simulation)을 포함하여 두개의 모듈이 있는데 하나는 계통상의 다양한 영역을 분석하고 다른 하나는 붕괴점(collapse point)의 분석에 따른 수정조치를 수행한다. 계통운영 상태 분석을 쉽고 편하게 하기 위해 프랑스 국영 제어센터에서 정적 안전도 환경을 갖는 GAMME 프로그램에 동적 안전도 시뮬레이션을 추가하여 통합 프로그램을 구축하였다. 이로써 운영자는 사용자의 필요에 따라 정적(Static) 및 동적(Dynamic) 특성 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

4. QSS 기법을 이용한 KERI-VSA 기반설계

본 원은 2004년부터 온라인 전력시스템 안전도 평가 기술 개발을 목표로 KERI-DSA 개발에 착수하였다. 개발 중인 KERI-DSA는 온라인 과도안전도 평가와 온라인 전압안전도 평가를 위한 전력시스템 해석 solution을 제공한다. 특히, KERI-VSA는 N-1 상정사고를 기반으로 교류 상정사고 해석, P-V 곡선을 이용한 최대전력전송점 산정, 중대 상정고장 스크리닝, 직류조류계산 기능 그리고 전압 붕괴점 계산을 위한 연속조류계산과 직접법을 구현하도록 기능을 설계하고 있다. 또한, 사양 설계 측면에서는 4,000 모션 이상 모의 가능하고 PSS/E 데이터와 호환, 사용자 편의를 고려한 GUI(Graphic User Interface) 그리고 향후 EMS와 연계를 위한 인터페이스(인터넷 연결 및 TCP/IP)를 고려하고 있다. 현재 진행 중인 KERI-VSA의 프로그램의 사양 및 개발 환경을 표 1에 나타내었다.

표 1. QSS를 이용한 KERI-VSA 개발환경

KERI-VSA 프로그램	개발환경
운영환경(OS)	Window 32 bit system
입출력 DB(I/O DB)	Microsoft(MS) Access DB (*.raw & *.csv 호환)
개발 언어(language)	Visual Basic .NET(GUI 구현) FORTRAN(엔진구현)
Operation Platform	MS .NET Framework (ver. 1.1)
Graphic Solution	Chart FX .NET(2D, 3D)

본 절에서는 KERI-VSA 기능 중에서 Fast time domain 시뮬레이션 구현을 위해 QSS 해석 기법을 이용한 프로그램의 기반설계를 제시한다. 우선 QSS 기법을 이용한 VSA 개발을 위해 모듈 단위의 기반설계를 그림 3과 같이 나타내었다. QSS를 이용한 장기 전압안전도 시뮬레이션을 위한 핵심 모듈은 조류계산을 담당하는 KERI-LF 모듈, QSS 시뮬레이션의 엔진에 해당하는 QSSSE 모듈 그리고 안전도 제약 모니터링 및 조치를 수행하는 SLMA 모듈로 구분할 수 있다.

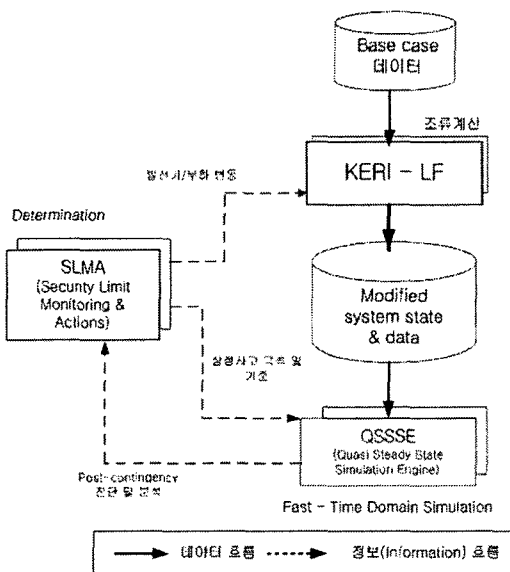


그림 3. QSS를 이용한 KERI-VSA 기반 설계도

기본 조류계산을 위한 Base case 데이터는 PSS/E

(ver.30)와 호환이 되고 raw 파일의 입력을 받아 데이터 그리드(Data grid)형태의 Access DB에 데이터 구성 요소별로 저장된다. 그림 4에 Access DB를 이용한 Base case 입력데이터 구현결과(한전계통 모션데이터)를 나타내고 있다. 입력받은 데이터를 이용하여 KERI에서 자체 개발한 조류계산 프로그램(KERI-LF)을 이용하여 조류 계산을 수행한다. QSSSE 모듈은 상정사고 해석과 전압 불안정 진단(Instability Diagnosis) 기능을 수행한다. SLMA 모듈은 그림 3에서 볼 수 있듯이 다른 두개의 모듈에 의해 호출 받고 해당 정보를 제공하며 주요 기능은 안전도 제약 모니터링을 수행한다.

그림 4. Base case 입력화면(구현결과-모션데이터)

5. 결 론

2003년 북미 광역정전이후 전압안전도를 포함한 안전도 해석 특히, EMS와 연계를 통한 온라인 안전도 평가에 대한 필요성이 많이 제기되었고 광역정전 예방을 위한 대책으로 각국에서 안전도 평가 프로그램 개발 및 적용을 활발히 추진하고 있는 실정이다. 이에 본 연구원이 추진 중인 KERI-DSA 연구개발도 향후 EMS와의 연계 목표포 온라인 계산이 가능한 알고리즘과 프로그램 구현을 위한 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 온라인 안전도 평가 프로그램 모듈 중에서 장기 전압안전도 해석을 위해, QSS 기법을 이용한 VSA 구현을 위한 기반설계를 제시하였고 현재 프로그램 기능 및 사양 그리고 데이터베이스와 조류계산 모듈 구현이 완료되었고 QSS 엔진 구현작업을 진행 중이다. 본 연구는 물리적인 프로그램의 개발도 큰 의미가 있지만 보다 중요한 것은 국내 계통을 대상으로 온라인 안전도 해석을 위한 데이터베이스 구축과 온라인 안전도 기술 확립에 있다. 향후 온라인 계산을 위한 알고리즘과 구현을 완료하여 KERI-VSA 모형을 완료할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Ruiz-Vega와 7, "Advanced perspectives and implement action of dynamic security assessment in the open market environment", CIGRE report session 2002, 39-101, 2002
- [2] T. Van Cutsem와 5, "On-line voltage security assessment of Hellenic Interconnected system", 2003 IEEE Bologna PowerTech conference in Italy, 2003
- [3] V. Sermanson, A. Giard, "Dynamic Voltage Security Assessment in Operational Planning at RTE, a way to improve the power system security", 2nd International Conference on critical infrastructure in France, 2004
- [4] Gilles Nativel와 3, "Integrated framework for voltage security assessment", IEEE Transactions on power systems, Vol. 15, No. 4, 2000