

전력계통 해석을 위한 UPFC 모델 연구

장병훈^{*} 전영수 김종선 이기선 추진부 백영기
한전 전력연구원

A study of UPFC model for Power system Analysis

Chang Byung-Hoon^{*} Jun Young-Su Kim Jong-Sun Lee Ki-Sun Chu Jin-Bu BaeK
Korea Electric Power Reserch Institute (KEPRI)

Abstract - 최근 전력계통 운용상 문제점을 해결하기 위하여 대용량 반도체 스위칭 소자를 이용한 전력전자 설비인 FACTS에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. FACTS 설비는 신속한 응답, 다양한 출력변화, 정교한 출력제어 등의 특성으로 전력계통 적용시 송전용량 증대, 조류제어 등의 효과를 가져오고 있다[7,8]. 본 논문에서는 최근 개발된 FACTS설비인 UPFC(Unified Power Flower Controllers)에 대한 실제 적용검토 연구를 위하여, 계통모의용 모델을 제시하고, 이에 대한 적용효과를 샘플계통에서 기존의 FACTS설비인 SVC, STATCOM과 비교하였다.

1. 서 론

UPFC는 계통에 단일 전압원의 직렬주입을 통해 선로 임피던스, 전압, 위상을 제어하고, 독립적인 분로보상으로 무효전력을 제어할 수 있다. 이는 계통에서 기존의 개폐 캐패시터/리액터, 탭변환 변압기 대신 정지형 전압원을 이용하여 단독으로 모든 전력 조류제어와 송전선로 보상을 조절할 수 있는 기술적 특성을 가지고 있다. 따라서, UPFC는 STATOM(Static Synchronous Compensator)와 TCTC/TCPR(Thyrisor Controlled Tap Changer /Phase Regulator)의 조합으로 생각할 수 있다 [1,2,3,4,6].

본 논문에서는 UPFC의 조류계산 및 동적해석 모델로 분로측을 STATCOM으로, 직렬측을 TCTC/TCPR로 고려하였다. 분로측의 STATCOM은 모선에 분로로 변압기를 통해 연결된 인버터로서 계통의 AC전압에 의해 무효전력보상을 제어기능을 가지고 있으며, 직렬측의 TCTC/TCPR은 선로에 직렬주입되는 인버터로서 계통 선로전류에 의해 직렬보상을 할 수 있다.

2장에서는 UPFC모델을 제시하였으며, 3장에서는 UPFC모델에 대한 적용효과를 2-area 샘플계통에서 SVC, STATCON과 비교하여 고유치 및 interarea mode 댐핑효과 분석하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC 분로모델

UPFC의 분로측은 SATCOM으로 고려될 수 있으며, 조류계산을 위한 STATCOM 모델은 무효전력만을 제어하는 동기기로 모델링될 수 있다[5,6]. 동적해석을 위한 STATCOM 모델은 전압원 인버터로 구동되는 SVC로 고려할 수 있으며, STATCOM 제어 블록 다이어그램은 그림 2.1과 같다[6].

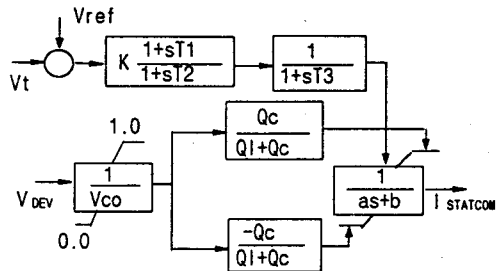


그림 2.1 STATCOM 제어 블록 다이어그램

위 그림에서 계통에 주입되는 전류와 입력에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$I_{STATCOM}(s) = \frac{1+sT1}{1+sT2} \frac{1}{1+sT3} \frac{1}{as+b} V_{DEV}(s) \quad (식 2.1)$$

여기서,

$T1, T2, T3$ = 시정수

a, b = 파라미터

$V_{DEV} = V_{ref} - V_t$

위 식에서 a, b 는 펄스동기화와 전류모드의 제어를 위한 integrator, time lag 또는 gain 등을 포함시킬 수 있는 파라미터이다. 그림 2.1의 싸이리스터 제어 입력신호의 상한과 하한에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{Q_c}{Q_1 - Q_c} = \frac{1}{V_\infty} V_{DEV} \quad (\text{식 2.2})$$

여기서,

Q_1, Q_c = 유도성, 용량성 보상범위

V_∞ = cut off voltage

2.2 UPFC 직렬모델

UPFC의 직렬측은 TCTC/TCPR을 조합하여 고려될 수 있으며, 조류계산에서 전압과 위상제어가 가능한 탭변환 변압기로 모델링될 수 있다[5,6]. TCTC/TCPR의 등가회로는 그림 2.2와 같다.

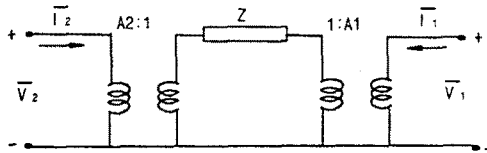


그림 2.2 TCTC/TCPR 등가회로

위의 그림에서 Z 는 변압기 누설 어드미턴스 Y 에 대한 임피던스 값이며, 전압과 전류에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= Y_{11} \bar{V}_1 + Y_{12} \bar{V}_2 \\ \bar{I}_2 &= Y_{21} \bar{V}_1 + Y_{22} \bar{V}_2 \end{aligned}$$

여기서, (식 2.3)

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{Y}{|A_1|^2} & Y_{12} &= \frac{Y}{A_2 A_1} \\ Y_{21} &= \frac{Y}{A_1 A_2} & Y_{22} &= \frac{Y}{|A_2|^2} \end{aligned}$$

위 식에서 TCTC/TCPR의 출력과 변압비에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 + AT_T(1 - XT_T)T_{TCSC} + jAT_P(1 - XT_P)T_{TCPR} \\ A_2 &= 1 - AT_T \cdot XT_T \cdot T_{TCSC} - jAT_P \cdot XT_P \cdot T_{TCPR} \end{aligned} \quad (\text{식 2.4})$$

여기서,

$AT_T(AT_P)$ = 탭변환기, 위상변압기 전압제어범위

$XT_T(XT_P)$ = 탭변환기, 위상변압기 병렬권선위치

$T_{TCTC}(T_{TCPR})$ = 탭변환기, 위상변압기 제어출력

탭변환기와 위상변압기의 제어보상범위는 AT_T 와 AT_P 에 의해 결정된다. AT_T 와 AT_P 는 각 탭 사이즈가 탭회수와 곱해진 것을 나타내는 팩터로서, 탭변환에서의 AT_T 는 0.0~0.5의 범위를 갖는다. 예를 들어 $AT_T=0.5$ 이면, -50% ~ 50%의 탭변

환을 의미한다. 위상변압의 AT_P 는 0.0~2.0의 범위를 갖는다[6]. XT_T 와 XT_P 는 각각 탭변환기와 위상변압기의 직렬권선에 대한 병렬권선의 위치를 나타낸다. 예를 들어 0이면 1차측 조절, 0.5이면 중간 조절, 1.0이면 2차측 조절이 된다.

식 2.4의 T_{TCTC} 와 T_{TCPR} 는 싸이리스터 출력으로, 이에 대한 제어 블록다이어그램은 각각 다음과 같다[6].

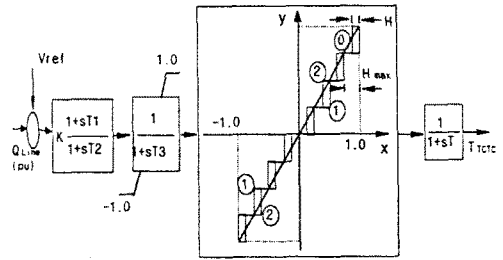


그림 2.3 TCTC 제어 블록다이어그램

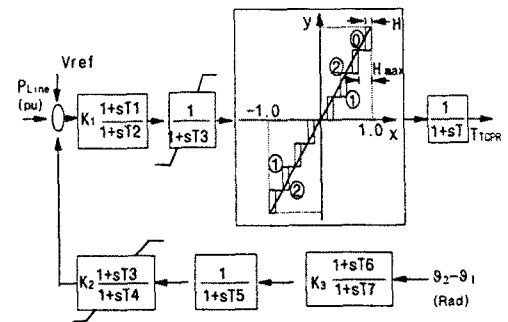


그림 2.4 TCPR 제어 블록다이어그램

위 그림에서 싸이리스터 블록내의 H 는 히스테리시스 폭으로서 한 스텝당 0.1~0.5의 범위를 갖는다.

또한, 싸이리스터 블록 입력을 S_{TCTC} , S_{TCPR} 이라고 하고, ΔT_{TCSC} 또는 ΔT_{TCPR} 을 x 라고 하면,

$$\dot{x} = -\frac{1}{T_{TP}} x + \frac{1}{T_{TP}} \Delta S_{TCTC \text{ or } TCPR} \quad (\text{식 2.5})$$

이 된다. 여기서 T_{TP} 는 싸이리스터이후 블록의 시정수이다.

3. UPFC모델 적용사례

2장에서 제시된 UPFC모델을 샘플계통에 적용하여 미소신호안정도 개선효과를 SVC, STATCOM과 비교하였다. 잘 알려진 2-area 샘플계통의 초기 조류 및 계통조건을 그림 3.1에서 보았다.

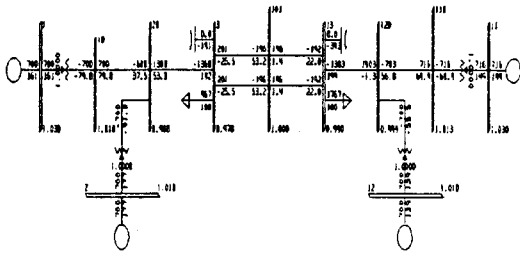


그림 3.1 2-area system 계통도

위 계통의 미소신호안정도 해석결과 관심고유치 및 댐핑비는 다음과 같다.

표 3.1 2-area 계통의 미소신호안정도 해석결과

고유치	주파수	댐핑비	mode
$-0.013161 + j3.73$	0.594	.0033	interarea
$-0.641430 + j6.80$	1.083	.0938	area1 loc
$-0.578058 + j7.32$	1.166	.0786	area2 loc

2-area 계통의 전압안정도 해석결과는 다음과 같다.

표 3.2 2-area 계통의 전압안정도 해석결과

순위	고유치
1	22.461323
2	38.665665
3	97.896324

표 3.2에서 최소 고유치에 대한 모션참여율은 표3.3과 같다.

표 3.3 최소 고유치에 대한 모션참여율

순위	모션번호	참여율
1	13	.32635
2	3	.31389
3	120	.14452
4	20	.13777
5	110	.03985
6	10	.03762

표 3.3의 결과로 13번 모선에 SVC, STATCOM을 각각 동일용량으로 적용하였고, UPFC는 기 적용되었던 STATCOM과 TCTC/TCPR를 조합하여 적용하였다. SVC, STATCOM, UPFC 각각을 적용한 계통과 원래계통에 대해 미소신호안정도를 해석한 결과는 다음과 같다.

표 3.4 Interarea mode 진동 댐핑효과 비교

FACTS	고유치	주파수	댐핑비
원래계통	$-0.013161 + j3.73$	0.594	.0033
SVC	$-0.014818 + j3.77$	0.600	.0039
STATCOM	$-0.026580 + j3.71$	0.591	.0072
UPFC	$-0.028225 + j3.17$	0.505	.0089

4. 결 론

전력계통의 모든 전력제어를 가능하게 하는 UPFC의 전력계통 해석용 모델을 위해 분로측을 STATCOM으로 직렬측을 TCTC/TCPR로 조합하여 모델링하였다. 이 모델을 2-area 샘플계통에 적용한 결과 interarea mode의 진동댐핑에 대한 UPFC의 적용효과가 SVC, STATCOM의 경우보다 우수한 것으로 분석됐다.

전력계통 해석을 위한 UPFC의 또 다른 모델링 방법은 HVDC모델을 이용하여 가능하다.

(참 고 문 헌)

- [1] CIGRE FACTS SOCIETY, "FACTS OVERVIEW", CIGREI, 95 TP 108, 1995. 4
- [2] L. Gyugyi, A. Edris 외, "The Unified Power Flow Controller : A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, 1995. 4
- [3] A. Nabavi-Niaki, M.R. Irvani, "Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller(UPFC) for Power System Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, 1996. 11
- [4] Laszlo Gyugyi, "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, 1994. 4
- [5] EPRI "Interactive Power Flow - Version 4.1", TR-103643, Final Report Vol. 2, 1994. 5
- [6] EPRI "Small Signal Stability Analysis Program - Version 4.1", TR-101850, Final Report Vol. 2, 1994. 5
- [7] 과학기술처, 한국전력공사, "FACTS 연구기획사업", 1995.
- [8] 전력연구원 "송전선로 송전용량 증대방안에 관한 연구" KRC-94Y-S12, 1996. 9