

**اثر بارهای دینامیکی بر بازیافت ولتاژ شبکه**

چکيده

پايداری ولتاژ يکی از مسائل مهم و مورد توجه در سيستم­های قدرت است، این درحالي است که سيستم­ها با افزايش ميزان بارگذاری و محدوديت­های توسعه شبکه مواجهند. پايداری ديناميکی ولتاژ به معنی پاسخ ديناميکی مناسب يک سيستم قدرت به اغتشاشات کوچک و پيوسته و يا تغييرات ناگهانی و شديد، جهت حفظ ولتاژ مجاز در تمامی باس­ها در مرحله بهره­برداری است. مهمترين عامل­فروپاشی ولتاژ، ناتوانی سيستم انتقال در پاسخ به افزايش تقاضای توان راکتيو شبکه می­باشد که معمولا به علت عدم وجود ذخيره کافی توان راکتيو يا نصب نامناسب جبران­کننده­ها اتفاق می‌افتد.

در این پروژه ابتدا انواع پایداری معرفی گشته سپس توجه خود را روی پایداری ولتاژ معطوف کرده و عوامل ایجاد ناپایداری ولتاژ در شبکه را نام برده و در ادامه بحث با استفاده از شبیه­سازی یک شبکه شعاعی ساده در نرم­افزار ETAP v12.6 به بررسی بازیافت ولتاژ و انواع آن در شبکه وهمچنین تحلیل پدیده بازیافت آهسته ولتاژ بعد از خطا و رابطه آن با بحث پایداری ولتاژ پرداخته می­شود.

فهرست مطالب

چکیده.........................................................................................................................................................ز

1-مقدمه...................................................................................................................................................1

1-1 مروری بر مسائل پایداری............................................................................................................1

2-پایداری سیستم های قدرت.......................................................................................................5

2-1 مقدمه..............................................................................................................................................5

2-2 تعریف مفاهیم پایه........................................................................................................................6

2-2-1 پایداری زاویه ای روتور............................................................................................................7

2-2-1-1 مشخصه‌های ماشین سنکرون...........................................................................................................7

2-2-1-2 رابطه توان-زاویه.......................................................................................................................8

2-3 پدیده پایداری............................................................................................................................11

2-4 مقدمه‌ای بر پایداری ولتاژ.......................................................................................................15

2-4-1 تعریف پایداری ولتاژ...............................................................................................................15

2-4-2 موضوعات پایداری ولتاژ.........................................................................................................15

2-4-3 ناپایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ............................................................................................16

2-4-4مفاهیم اساسی مربوط به پایداری ولتاژ..................................................................................18

2-5 انواع پایداری ولتاژ................................................................................................................................23

2-5-1 تحلیل پایداری ولتاژ................................................................................................................23

2-5-2 پایداری میان مدت و بلندمدت..............................................................................................25

3-تحلیل و شبیه‌سازی پدیده بازیافت ولتاژ تاخیری ناشی از وقوع خطا............27

3-1 مقدمه........................................................................................................................................27

3-2 معرفی پدیده بازیافت ولتاژ تاخیری ناشی از وقوع خطا.............................................28

3-3 مدل‌سازی بار.........................................................................................................................29

3-3-1 بار امپدانس ثابت.................................................................................................................29

3-3-2 بار جریان ثابت....................................................................................................................29

3-3-3 بار توان ثابت......................................................................................................................29

3-3-4 **مدل** Polynomial.............................................................................................................30

3-3-5 مدل Exponential............................................................................................................30

3-3-6 مدل وابسته به فرکانس.......................................................................................................30

3-4 شبیه‌سازی خطا سه فاز متقارن روی یک شبکه شعاعی ساده و تحلیل آن................31

3-4-1 مشخصات شبکه...................................................................................................................31

3-4-1-1 شبکه بالا دست() ......................................................................................................32

3-4-1-2 ترانسفورماتور قدرت ().........................................................................................32

3-4-1-3 موتورها ی القایی ()..................................................................................................32

3-4-1-4 موتور سنکرون()...................................................................................................33

3-4-1-5 بارهای استاتیکی().................................................................................................33

3-4-1-6 نمایش SLD شبکه شعاعی....................................................................................................34

3-4-2 اتصال کوتاه روی پست اول (باس 19)........................................................................................34

3-4-2-1 ولتاژ پست اول...............................................................................................................................35

3-4-2-2 توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بارهای استاتیکی................................................................................35

3-4-2-3 جریان مصرفی مصرفی بارهای استاتیکی..........................................................................................37

3-4-2-4 نتیجه شبیه‌سازی..........................................................................................................................37

3-4-3 اتصال کوتاه روی پست دوم (باس4).......................................................................................38

3-4-3-1 ولتاژ پست دوم............................................................................................................................38

3-4-3-2 تحلیل ونتیجه‌گیری.....................................................................................................................38

3-4-3-3 رفتار بار موتوری در هنگام کاهش ولتاژ...........................................................................................39

3-4-3-4 تغییرات لغزش هریک ازموتور های القایی پس از وقوع خطا................................................................42

3-4-3-5 تحلیل ونتیجه‌گیری......................................................................................................................42

3-4-4 رفتار بار موتوری پس از رفع خطا...........................................................................................43

3-4-4-1 بررسی حالت اول.......................................................................................................................43

3-4-4-1-1 توان اکتیو موتورهای پست دوم............................................................................................................44

3-4-4-1-2 توان راکتیو موتورهای پست دوم...........................................................................................................45

3-4-4-1-3 **گشتاور موتورهای پست دوم.........................................................................................**46

3-4-4-1-4 **جریان مصرفی موتورهای پست دوم**......................................................................................................47

3-4-4-1-5 تحلیل و نتیجه‌گیری .....................................................................................................................47

3-4-4-2 بررسی حالت دوم...................................................................................................................49

3-4-4-2-1 ولتاژ پست دوم..............................................................................................................................50

3-4-4-2-2 تغییرات لغزش موتورهای پست دوم.........................................................................................................51

3-4-4-2-3 توان اکتیو موتورهای پست دوم.............................................................................................................52

3-4-4-2-4 توان راکتیو موتورهای پست دوم..........................................................................................................53

3-4-4-2-5 گشتاور موتورهای پست دوم...............................................................................................................54

3-4-4-2-6 جریان مصرفی موتورهای پست دوم......................................................................................................55

3-4-4-2-7 تحلیل ونتیجه‌گیری .......................................................................................................................56

3-4-4-2-8 مدل موتور القایی قفل شده...............................................................................................................56

4-نتیجه گیری.......................................................................................................................................59

4-1 **زمان و مکان وقوع پدیده** FIDVR **در شبکه قدرت**..................................................................59

4-2 علت وقوع **پدیده** FIDVR............................................................................................................60

منابع و مراجع.........................................................................................................................................61

فهرست اشکال

شکل(2-1): نمودار تک خطی یک سیستم دو ماشینه............................................................................................ 10

شکل(2-2): مدل ایده آل یک سیستم دو ماشینه..................................................................................................... 10

شکل(2-3): نمودار فازوری یک سیستم دو ماشینه................................................................................................... 10

شکل(2-4): منحنی توان-زاویه یک سیستم دو ماشینه........................................................................................... 10

شکل(2-5): پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا................................................................................................ 14

شکل(2-6): یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ........................................................... 19

شکل(2-7): ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای بار برای سیستم شکل(2-6)...... 20

شکل(2-8): مشخصه های توان-ولتاژ سیستم شکل(2-6)...................................................................................... 21

شکل(2-9): مشخصه های - مربوط به سیستم شکل(2-6) با ضریب های مختلف توان بار................ 21

شکل(2-10): مشخصه های - مربوط به سیستم شکل (2-6) با نسبت‌های مختلف 22

شکل(3-1): رفتار ولتاژ هنگام وقوع پديده FIDVR در يك سيستم ساده..................................................... 29

شکل(3-2): دیاگرام تک خطی شبکه شبیه سازی شده........................................................................................ 34

شکل(3-3): نمودار تغییرات ولتاژ در اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پست اول............................................... 35

شکل(3-4): نمودار تغییرات توان‌های اکتیو و رکتیو مصرفی بارهای استاتیکی .............................................. 36

شکل(3-5): نمودار جریان مصرفی بارهای استاتیکی............................................................................................... 37

شکل(3-6): نمودار تغییرات ولتاژ در اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پست دوم.............................................. 38

شکل(3-7): مقایسه نرخ تغییرات سرعت سه موتور با اینرسی های مختلف ،پس از وقوع خطا در ثانیه...0 40

شکل(3-8): تغییرات منحنی گشتاور \_لغزش به واسطه کاهش ولتاژ................................................................. 41

شکل(3-9): نمودار تغییرات لغزش در اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پست‌دوم............................................. 42

شکل(3-10): نمودار تغییرات توان اکتیو موتورهای متصل به پست دوم........................................................... 44

شکل(3-11): نمودار تغییرات توان راکتیو موتورهای متصل به پست دوم.......................................................... 45

شکل(3-12): نمودار تغییرات گشتاور محرک موتورهای متصل به پست دوم................................................... 46

شکل(3-13): نمودار تغییرات جریان مصرفی موتورهای متصل به پست دوم................................................... 47

شکل(3-14):مدار معادل یک فاز موتور‌القائی.............................................................................................................48

شکل(3-15): رابطه بین توان اکتیو مصرفی شین و ولتاژ شبکه........................................................................... 49

شکل(3-16): رابطه بین توان راکتیو مصرفی شین و ولتاژ شبکه......................................................................... 49

شکل(3-17): نمودار تغییرات ولتاژ پست دوم........................................................................................................... 50

شکل(3-18): نمودار تغییرات لغزش موتورهای متصل به پست دوم................................................................... 51

شکل(3-19): نمودار تغییرات توان اکتیو موتورهای متصل به پست دوم........................................................... 52

شکل(3-20): نمودار تغییرات توان راکتیو موتورهای متصل به پست دوم......................................................... 53

شکل(3-21): نمودار تغییرات گشتاور محرک موتورهای متصل به پست دوم................................................... 54

شکل(3-22): نمودار تغییرات جریان مصرفی موتورهای متصل به پست دوم.................................................... 55

شکل(3-23): تغییرات منحنی گشتاور-سرعت در هنگام افزایش مجدد ولتاژ................................................... 56

شکل(3-24): نمودار تغییرات ضریب قدرت بر اساس تغییرات سرعت در یک موتور‌القائی نمونه................ 57

شکل(3-25): نمودار تغییرات جریان موتوربر اساس تغییرات ولتاژ در موتور‌القائی قفل شده....................... 57

فهرست جداول

جدول (3-1): مشخصات اتصال کوتاه................................................................................................................ 31

جدول (3-2): مشخصات شبکه بالادست.......................................................................................................... 32

جدول (3-3): مشخصات ترانس های قدرت..................................................................................................... 32

جدول (3-4): مشخصات موتور های‌القائی........................................................................................................ 32

جدول (3-5): مشخصات موتور سنکرون.......................................................................................................... 33

جدول (3-6): مشخصات بارهای استاتیکی...................................................................................................... 33

جدول (3-7): مشخصات جدید بار موتورهای‌القائی 1و2................................................................................ 50

جدول(3-8): مقدار پارامتر‌های موتور در حالت عادی.....................................................................................58

جدول(3-9): مقدار پارامتر‌های موتور در حالتی قفل شده است................................................................... 58

فصل اول

مقدمه

1-1 مروری بر مسائل پایداری

پایداری سیستم قدرت، موضوع پیچیده­ای است که در طول سال­ها مورد توجه و بحث مهندسان سیستم قدرت بوده است. مروری بر تاریخچه این موضوع به درک بهتر مسائل امروزی پایداری کمک می‌کند.

پایداری سیستم قدرت ابتدا در سال 1920 میلادی به عنوان یک مسأله مهم در سیستم قدرت مطرح گردید]1[. نتایج اولین آزمایش‌ها بر روی سیستم‌هایی با مقیاس کوچک در سال 1924 میلادی ارائه شد. اولین آزمایش­های میدانی، مربوط به پایداری یک سیستم قدرت واقعی در سال 1925 میلادی انجام پذیرفت. در ابتدا مسائل پایداری مربوط به نیروگاه‌های آبی می‌شد که از راه دور و از طریق خطوط انتقال طولانی، مراکز بار­شهری را تغذیه می‌کردند. به دلایل اقتصادی، این سیستم‌ها را نزدیک به حدود پایداری حالت ماندگار خود مورد بهره­برداری قرار می­دادند. در بعضی حالات، ناپایداری در حالت بهره­برداری ماندگار سیستم اتفاق می­افتاد، اما اغلب به دنبال خطاهای اتصال‌کوتاه و سایر اغتشاش­های سیستم، واقع می شد]2[.پایداری سیستم تا حد زیادی از توانایی سیستم­انتقال، تأثیر می­پذیرفت و ناپایداری به علت کمبود گشتاور سنکرون­کننده رخ می­داد. سیستم­های رفع­خطا کند بودند و در محدوده 0.5 تا 2.0 ثانیه (و حتی بیشتر) عمل می­کردند]3[.

مدل­ها و روش­های محاسباتی مورد استفاده، به تجهیزات محاسباتی روز و پیشرفت در مسأله نظریه پایداری سیستم­های دینامیکی بستگی داشت. با وجود خط­کش های محاسباتی و ماشین­های حساب مکانیکی، مدل­ها و روش­های محاسباتی بایستی ساده می­بودند. به علاوه، روش­های تصویری از جمله معیار سطوح مساوی وتصاویر دایره­ای مطرح شده بودند. این روش­ها برای بررسی سیستم­های ساده که بتوان آن­ها را به صورت سیستم دو واحدی در نظر گرفت، مناسب بودند. پایداری ماندگار و گذرا به طور جدا مورد مطالعه قرار می­گرفتند.پایداری گذرا را به شیب و اوج منحنی توان-زاویه ربط می­دادند و این موضوع را که نوسان­ها میرا می­شود، بدیهی می­انگاشتند.

به تدریج که سیستم­های قدرت رشد کرده و به هم پیوستند، سیستم­های مستقل از دیدگاه اقتصادی جنبه عملی به خود گرفتند، پیچیدگی مسائل پایداری، افزایش یافت. اکنون دیگر نمی‌توانستیم سیستم­ها را به صورت دو واحدی مدل­کنیم.گامی مهم در بهبود روش­های محاسبات پایداری، با ساخت تحلیلگر شبکه در سال 1930 میلادی برداشته­شد. این وسیله، در حقیقت مدلی با مقیاس کوچک از یک سیستم­قدرت جریان متناوب بود که با استفاده از مقاومت­ها، راکتورها و خازن­های قابل تنظیم، شبکه انتقال و بار را مدل می‌نمود. برای نمایش ژنراتورها، از منابع ولتاژ با دامنه و زاویه قابل تنظیم و از اندازه­گیر­ها به منظور اندازه­گیری جریان، ولتاژ و توان در سرتاسر شبکه استفاده می شد.این وسیله،امکان مطالعه و بررسی پخش بار شبکه­های چند ماشینه را فراهم می­کرد. با وجود این، هنوز می­بایست معادله حرکت یا تاب (نوسان)، با روش­های دستی و یا استفاده از انتگرال­گیری گام به گام حل می­شد.

آنچه از دیدگاه نظری در دو دهه 1920 و 1930 میلادی انجام پذیرفت، پایه لازم برای درک مسأله پایداری سیستم قدرت از طرف صنعت را بنیان گذاشت. در این زمان، دانش مربوط به پایداری سیستم قدرت، به علت مطالعه مربوط به انتقال در طی مسیرهای طولانی، فراهم­گردید و از دیدگاه نظری ماشین­های سنکرون مورد­توجه نبود. تاکید، بر شبکه بود و ژنراتورها را به صورت منابع ولتاژ و به دنبال آن یک راکتانس ثابت و بارها را به صورت امپدانس ثابت مدل می­کردند. این مسأله، به دلیل ابزار محاسباتی موجود دیکته می­شد زیرا این ابزار، برای حل معادلات جبری و نه معادلات دیفرانسیل، مناسب بود.

امکان بهبود پایداری سیستم با استفاده از سیستم­های رفع خطای سریع­تر و تنظیم­کننده­های ولتاژ با عملکرد پیوسته بدون وجود باند راکد فراهم گردید. منافع یک سیستم تحریک با عکس العمل سریع،در اوایل دهه 1920 میلادی به منظور افزایش پایداری حالت ماندگار مطرح گردید. با وجود این، در ابتدا این محدوده پایداری دینامیکی برای عملکرد معمولی پیشنهاد نمی­شد بلکه به عنوان یک حاشیه اضافی در تعیین حدود کاری سیستم، استفاده می­شد. با افزایش درک و توانایی­های سیستم تحریک با عکس­العمل سریع در محدود کردن اولین نوسان ناپایداری گذرا و نیز افزایش حدود انتقال توان حالت ماندگار، استفاده از آنها رواج پیدا کرد. با این همه، استفاده از چنین سیستم­هایی در بعضی حالات منجر به کاهش میرایی نوسان­های توان می­گردید. از این‌رو، ناپایداری نوسانی به صورت یک مسأله مطرح شد حال آنکه عملاً ناپایداری حالت ماندگار به صورت رانش یکنوای زاویه روتور حذف گردید. این مسائل نیازمند ابزار محاسباتی بهتری بود. بایستی ماشین سنکرون و سیستم تحریک با جزئیات بیشتری مدل می­شدند و شبیه­سازی برای محدوده زمانی طولانی­تری صورت می­پذیرفت.

در اوایل دهه 1950 میلادی، کامپیوترهای آنالوگ برای بررسی مسائلی که نیازمند مدل‌سازی مشروح­تر ماشین سنکرون، سیستم تحریک و گاورنر سرعت بودند، مورد استفاده واقع شدند. چنین شبیه­سازی­هایی برای مطالعه­ی عمیق تأثیر مشخصه­های تجهیزات و نه رفتار کلی سیستم چند ماشینه مناسب بودند. در دهه­ی 1950 میلادی، کامپیوترهای دیجیتال نیز ظهور کردند. اولین برنامه مطالعه پایداری سیستم قدرت بر روی چنین کامپیوترهایی حدود سال 1956 میلادی پیاده شد. مدل­های مورد استفاده در برنامه­های کامپیوتری اولیه مشابه مدل­های مورد استفاده در تحلیل گره­های شبکه بود. به زودی مشخص شد که این کامپیوتر­ها برای مطالعه شبکه از دید اندازه و ابعاد شبکه و امکان مدل‌سازی مشروح­تر مشخصه­های دینامیکی تجهیزات، بر تحلیلگرهای شبکه برتری دارند. این موارد وسیله مناسبی برای مطالعه مسائل پایداری سیستم­های به هم پیوسته­ای بودند که پیشتر به صورت سیستم­های مستقل عمل می­کردند.

در دهه­ی 1960 میلادی اغلب سیستم­های قدرت موجود در ایالت متحده امریکا و کانادا به صورت بخشی از دو سیستم به هم پیوسته بزرگ، یکی در شرق و دیگری در غرب درآمد.در سال 1967 میلادی،خطوط کم ظرفیت ارتباطی فشار قوی جریان مستقیم، بین سیستم­های شرق و غرب برقرار شد.

در حال حاضر، عملاً سیستم­های قدرت موجود در این دو کشور، یک سیستم بزرگ را تشکیل داده­اند. در حالی که به هم پیوستگی سیستم­ها از دیدگاه بهره‌برداری اقتصادی و افزایش قابلیت اعتماد از طریق همکاری متقابل، مهم است، از دیدگاه مسائل پایداری، به افزایش پیچیدگی منجر می­شود و عواقب ناپایداری را افزایش می­دهد. خاموشی کامل در نهم نوامبر سال 1965 میلادی در منطقه شمال شرق این موضوع را کاملا آشکار ساخت و باعث شد که مسأله پایداری و اهمیت قابلیت اعتماد سیستم­های قدرت از محدوده توجه مهندسان به سطح عموم و مؤسسات استاندارد کشانده شود.

از دهه 1960 میلادی، بیشتر تلاش و توجه صنعت به پایداری گذرای سیستم معطوف بوده است. سیستم های قدرت از دیدگاه معیارهای مربوط به پایداری گذرا طراحی و بهره برداری می­شوند. در نتیجه، ابزار اصلی مطالعه پایداری در طراحی و بهره برداری، برنامه­ی پایداری گذرا بوده است. برنامه­های قدرتمندی تهیه شده که امکان نمایش سیستم­های بسیار بزرگ و مدل‌سازی مشروح تجهیزات در آن­ها فراهم آمده است. با پیشرفت روش های عددی و تکنولوژی کامپیوترهای دیجیتال، این موضوع تا حد زیادی تسهیل شده است‌، همچنین پیشرفت زیادی در زمینه مدل‌سازی و آزمایش تجهیزات، به خصوص در مورد ماشین های سنکرون، سیستم­های تحریک و بار صورت گرفته به علاوه بهبود چشمگیری در عملکرد پایداری گذرای سیستم قدرت از طریق استفاده از تجهیزات سریع رفع خطا،سیستم­های تحریک با عکس العمل سریع،خازن­های سری و روش­های خاص تقویت پایداری، حاصل شده است.

همراه با پیشرفت­های مذکور، تمایل سیستم­های قدرت به ناپایداری نوسانی، افزایش یافته است. سیستم‌های تحریک با عکس العمل سریع هرچند به بهبود پایداری گذرا کمک می‌کنند، لیکن بر پایداری اغتشاش کوچک مد محلی نوسانی با کاهش میرایی، تاثیر سوء می­گذارند.تاثیر منفی سیستم­های تحریک سریع با کاهش قدرت سیستم­های انتقال نسبت به اندازه واحدهای تولید، باز هم افزایش می­یابد.

موضوع دیگری که به ناپایداری نوسانی کمک می­کند، تشکیل و در نتیجه رشد پیوستگی بین سیستم­های قدرت، که از طریق خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل‌اند می‌باشد. در توان­های انتقالی زیاد،چنین سیستم­هایی، مدهای نوسانی فرکانس-کم بین ناحیه ای را تجربه می‌نمایند. در بسیاری از حالات ناپایداری این مدها موضوع مهمی می‌باشند.

وضعیت موجود در برنامه­ریزی و بهره برداری سیستم­های قدرت منجر به انواع جدیدی از مسائل پایداری شده است. مسائل مالی و شرایط استاندارد باعث شده­است شرکت­های تولید کننده برق، سیستم­های قدرت را با افزونگی کمتری بسازند و آنها را نزدیکتر به حدود پایداری گذرا مورد بهره‌برداری قرار دهند.به هم پیوستن‌ها با استفاده از تکنولوژی‌های جدید و از جمله سیستم انتقال فشار قوی جریان مستقیم چند پایانه ای، همچنان در حال رشد است.علاوه بر این استفاده وسیع­تری از خازن‌های موازی صورت می­پذیرد.ترکیب و مشخصه­های بارها تغییر می­کند.این موضوع­ها باعث شده تا در مشخصه­های دینامیکی سیستم­های مدرن قدرت، تغییرات فراوانی صورت پذیرد. مدهای ناپایداری پیچیدگی روزافزونی پیدا می‌کنند و بررسی آن‌ها نیازمند توجه جامع به جنبه­های مختلف پایداری سیستم است. به خصوص ناپایداری ولتاژ و نوسان‌های فرکانس کم بین ناحیه­ای، نسبت به گذشته نیازمند توجه بیشتری است.در حالیکه پیشتر ،این مسائل در شرایط و موقعیت­های خاصی اتفاق می­افتاد، اکنون تقریباً در همه­جا رایج شده است. نیاز به بررسی عکس‌العمل دینامیکی بلند مدت سیستم به دنبال وقوع آشفتگی­های شدید در سیستم و اطمینان از هماهنگی صحیح بین سیستم­های کنترلی و حفاظتی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر تحقیقات و پیشرفت‌های بسیاری انجام شده است که به درک بهتر جنبه‌های فیزیکی مسائل جدید پایداری و نیز ایجاد ابزار محاسباتی لازم برای بررسی و طراحی بهتر سیستم، کمک می‌نماید. پیشرفت در زمینه نظری سیستم‌های کنترل و روش‌های عددی، تأثیر شگرفی بر این کار گذاشته است.

فصل دوم

پایداری سیستم‌های قدرت

2-1 مقدمه

در این فصل به معرفی کلی مسأله پایداری سیستم قدرت شامل مفاهیم فیزیکی، طبقه بندی و تعاریف واژه‌های مربوطه پرداخته می‌شود، سپس به صورت مفصل در مورد یکی از انواع پایداری‌ها با نام پایداری ولتاژ بحث می­گردد.

با تغيير ساختار جديدي كه در سال­هاي اخير در سيستم‌هاي قدرت پديد آمده كه باعث شده تا واحدهاي توليدي، توان الكتريكي هرچه بيشتري را از خطوط انتقال عبور دهند، انتظار مي‌رود شاهد فروپاشي ولتاژ گسترده­تر و بيشتر در سيستم­هاي قدرت باشيم. براي مثال عبور توان بيش از حد يك خط انتقال باعث افت ولتاژ بيش از حد و كاهش ظرفيت انتقال توان الكتريكي به بخش مشخصي از سيستم‌قدرت می‌گردد.

امروزه بحث پایداری یکی از بحث­های مهم در سیستم­های قدرت می­باشد از این رو باید با مطالعه پایداری­های مختلف از جمله پایداری ولتاژ تجربه خود را بالا برده تا در هنگام بروز مشکل آسیب­های جدی به شبکه وارد نشود.

یکی از مسائل مرتبط با پایداری ولتاژ وقوع پدیده بازیافت آهسته ولتاژ پس از رفع خطا در شبکه­ها با تجمع بالای بار دینامیک می‌باشد که یکی از عوامل زمینه ساز ناپایداری ولتاژ است . در فصل بعد به طور مفصل و با استفاده از شبیه­سازی به تحلیل پدیده بازیافت آهسته ولتاژ پس از رفع خطا می­پردازیم.

2-2 تعریف مفاهیم پایه

پایداری سیستم‌قدرت را می­توان بطور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می­سازد تا تحت وضعیت عادی، در حالت تعادل باقی‌بماند و در صورتی که تحت تأثیر اغتشاشات قرار­گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را بدست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکل­های مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مسأله پایداری را به عنوان مسأله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتورها بشناسند. ازآنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین­های سنکرون (ژنراتورها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین­های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا هماهنگ باقی‌بمانند. این جنبه پایداری تحت تأثیر دینامیک روابط زاویه روتور و توان حقیقی-زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرونیزم آن از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القائی را تغذیه می‌کند، در اثر فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسأله، پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می‌تواند در مورد بارهایی که در یک محدوده وسیع قرار دارند و از یک سیستم بزرگ تغذیه می‌شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسأله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار­گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییرات بار مدام اتفاق می‌افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می‌کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثر مقدار بار را تأمین نماید. همچنین باید بتواند در مقابل اغتشاش­های سخت از قبیل اتصال‌کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور و یا از دست دادن خط ارتباطی بین دو زیر سیستم، مقاوم باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتاً ناشی از نحوه عملکرد تجهیزات تشکیل­دهنده آن است. به عنوان مثال، اتصال‌کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می‌شود و آن جزء به وسیله رله‌های محافظ از سیستم جدا می‌گردد، باعث می‌شود که تغییراتی را در توان­های انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت­های روتور ژنراتورها و ولتاژ شین­ها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده­های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می‌شود، حال آن که تغییرات، سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرک­ها (توربین ها) را به عکس العمل وا می­دارد. تغییرات در توان­های انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستم­های کنترل تولید را به کار‌اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می‌شود که بستگی به مشخصات آن­ها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر‌نماید. به علاوه، سیستم­های محافظ اجزا ممکن است نسبت به تغییرات در متغیرهای سیستم، عکس العمل نشان دهد و بدین گونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص، عکس‌العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولاً فرضیات زیادی انجام می‌پذیرد تا مسأله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر یک مسأله پایداری بخصوص تأثیر می­گذارند، متمرکز کرد. درک مسائل پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه‌بندی آن به انواع مختلف، تسهیل نمود.

بخش­هایی که به دنبال می­آید انواع مختلف پایداری سیستم­های قدرت را مطرح می­نماید و سپس به بررسی کامل پایداری ولتاژ پرداخته می‌شود.

2-2-1 پايداری زاویه‌ای روتور

پايداری زاويه‌ای روتور توانايی ماشين‌های به هم پيوسته سنکرون يک سيستم قدرت است که درحالت سنکرون با يکديگر باقی‌بمانند. مسأله پايداری در اين حالت شامل مطالعه نوسان­های الکترومکانيکی است که به طور ذاتی در سيستم­های قدرت وجود دارد. عامل مهم در اين مسأله، نحوه رفتار توا­ن­های خروجی ماشين‌های سنکرون در مقابل نوسان­های روتور آن­ها است .درگام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه‌های ماشين‌های سنکرون می‌تواند در درک مفاهيم اوليه مربوطه، مفيد واقع شود.

2-2-1-1 مشخصه­های ماشين سنکرون

در اين جا بحث به مشخصه­های اوليه مربوط به عملکرد سنکرون محدود می‌شود.يک ماشين سنکرون دو جزء اساسی شامل تحريک و آرمیچر دارد .معمولاً، تحريک روی روتور و آرمیچر روی استاتور واقع است. سيم‌پیچ تحريک با استفاده از جريان مستقيم تغذيه می‌شود .زمانی که روتور را با يک توربين بچرخانيم، ميدان مغناطيسی دوار سيم­پيچ تحريک، ولتاژهای متناوبی در سه فاز سيم پيچ‌های آرميچر استاتور، القاء می­نمايد. فرکانس ولتاژ متناوب القاء شده و جريان‌های حاصل در سيم‌پيچ‌های استاتور (زمانی که بار به آن متصل است ) بستگی به سرعت روتور دارد. از اين‌رو مشاهده می شود که فرکانس متغيرهای الکتريکي استاتور با سرعت مکانيکی روتور، سنکرون يا هماهنگ شده‌اند. از اين‌رو است که واژه ماشين سنکرون به کار می‌رود.

زمانی که دو يا چند ماشين سنکرون به يکديگر متصل می‌شوند، بايد ولتاژ وجريان استاتور همه ماشين‌ها دارای یک فرکانس باشند ودر نتیجه سرعت مکانيکی هر يک از اين ماشین‌ها، هماهنگ باشند. از اين رو روتور تمام ماشين‌های سنکرون به هم پيوسته، بايد با يکديگر سنکرونيزه باشند.

ترکيب فيزيکی (توزيع فضايی) سيم‌پيچ‌های آرميچر استاتور به گونه‌ای است که جريان‌های متغير با زمان که از سيم‌پيچ‌های سه فاز عبور می‌کنند، در حالت ماندگار ميدان مغناطيسی دواری را ايجاد می‌کنند که با سرعت روتور می‌چرخد. میدان‌های روتور و استاتور بر يکديگر تأثير می‌گذارند و از اينکه دو ميدان‌سعی می‌کنند‌ در يک جهت قرار گيرند، گشتاور الکترومغناطيسی ايجاد می‌شود. در يک ژنراتور، اين گشتاور با جهت حرکت روتور مقابله می‌کند به گونه‌ای که لازم است گشتاور مکانيکی به وسيله توربين اعمال شودتا چرخش روتور همچنان حفظ گردد. گشتاور (يا توان) الکتريکی خروجی ژنراتور تنها زمانی تغيير می‌کند که گشتاور ورودی مکانيکی که به وسيلۀ محرک اعمال می‌شود، تغيير نمايد. تأثير افزايش گشتاور مکانيکی آن است که روتور را در وضعيت جديدی قرار می‌دهد که نسبت به ميدان دوار مغناطيسی استاتور جلوتر واقع می‌شود. يا برعکس، کاهش گشتاور يا توان مکانيکی ورودی، روتور را عقب‌تر از ميدان دوار مغناطيسی استاتور قرار می‌دهد. در حالت ماندگار، ميدان روتور و ميدان دوار حاصل از جريان‌های استاتور دارای سرعت مشابه هستند.با وجود اين، مقداری اختلاف زاويه‌ای بين آنها وجود داردکه بستگی به گشتاور(توان) خروجی الکتريکی ژنراتور دارد.

در يک موتور سنکرون نقش گشتاورهای الکتريکی و مکانيکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می‌شود. گشتاور الکتريکی چرخش را حفظ می‌کند حال آنکه بار مکانيکی با چرخش، مخالفت‌می‌کند. افزايش بار مکانيکی باعث عقب افتادن موقعيت روتور نسبت به ميدان دوار استاتور می‌شود.

در بحث فوق دو واژه توان و گشتاور توأما ًاستفاده شد. اين مسأله در فرهنگ پايداری سيستم‌های قدرت رايج است زيرا که سرعت چرخشی متوسط ماشين‌ها ثابت است هر‌چند که ممکن است تغييرات زود گذری، بالا و پايين سرعت سنکرون اتفاق افتد.در حقيقت مقادير توان و گشتاور در مبنای واحد، تقريباً با هم مساوی است.

2-2-1-2 رابطه توان – زاويه

مشخصه مهمی که در خصوص پايداری سيستم قدرت اهمیت دارد رابطه بين توان مبادله شده و موقعيت زاويه‌ای روتور ماشين سنکرون است. اين رابطه به شدت غير‌خطی است. برای نشان دادن موضوع، سيستم ساده شکل (2-1) را در نظر بگيريد. اين سيستم شامل دو ماشين سنکرون است که از طريق خط انتقالی با راکتانس xL به يکديگر متصل شده‌اند. از مقاومت وظرفيت خازنی خط صرف‌نظر شده است.

فرض کنيد که ماشين شماره 1 ژنراتور سنکرونی است که ماشين شماره 2 را، که يک موتور سنکرون است، تغذيه می‌کند توان انتقال يافته از ژنراتور به موتورطبق معادله (2-1) تابعی از زاويه δ است‌که اختلاف زاويه بين روتورهای دو ماشين را نشان می‌دهد،. زاويه δ خود از سه مؤلفه تشکيل شده است: يکی زاويه داخلی ژنراتور به نام δG )زاويه‌ای است که روتور ژنراتور نسبت به ميدان حاصل از استاتور آن جلوتر است(، ديگری δL ، اختلاف زاويه بين ولتاژ‌های پايانه ژنراتور و موتور )اختلاف زاويه‌ای که ميدان‌استاتور ژنراتور با ميدان استاتور موتور می‌سازد( و دیگری δM ، زاويه داخلی موتور ) زاويه‌ای است که روتور موتور نسبت به ميدان حاصل از استاتور می‌سازد(. شکل (2-2) مدلی از سيستم را نشان می‌دهد که به‌کمک آن می‌توان رابطه توان-زاویه را به دست آورد. برای هر ماشين، مدل ساده‌ای شامل يک منبع داخلی ولتاژ و يک راکتانس مؤثر فرض شده است.

مقدار راکتانس ماشين، بستگی به نوع مطالعه‌ای دارد که در پی آن هستيم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشين را به همراه ولتاژ تحريک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد . نمودار فازوری که ارتباط بين ولتاژ ها را نشان می‌دهد در شکل (2-3) نشان داده شده است. توان‌انتقالی‌از‌ژنراتور به موتور از رابطه (2-1) بدست می‌آید.

(2-1)

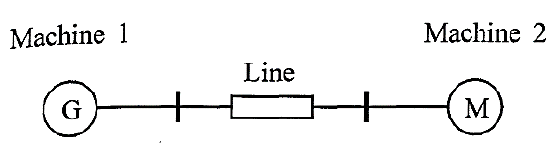
که:

*(2-2)*

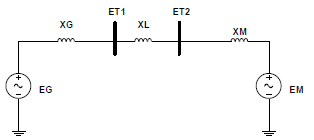
رابطه توان-زاویه در شکل (2-4) رسم شده است. با مدل‌های نسبتاً ایده‌آلی که برای ماشین‌ها فرض شد، رابطه به دست آمده به صورت سينوسی است که رابطه کاملا غيرخطی را نشان می‌دهد. با مدل‌های دقيق‌تر ماشين، که تأثير سيستم‌های تحريک (تنظيم کننده های خودکار ولتاژ) را نيز در نظر گرفته، رابطه توان-زاویه به ميزان زيادی از حالت سينوسی خارج می‌شوداما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.

زمانی‌که زاويه صفر است هيچ توانی مبادله نمی‌شود. هر‌چه زاويه افزايش داده شود توان نيز افزايش می‌یابد تا به حداکثرمقدارخود برسد.اگر زاویه از 90 درجه بیشتر شود، توان، کاهش می‌یابد. از این رو در حالت ماندگار می‌توان حداکثر، توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار اين توان مستقيماً با ولتاژهای داخلی ژنراتور و موتور و به طور معکوس با مجموع راکتانس‌های هر دو ماشين و خط انتقال، متناسب است.

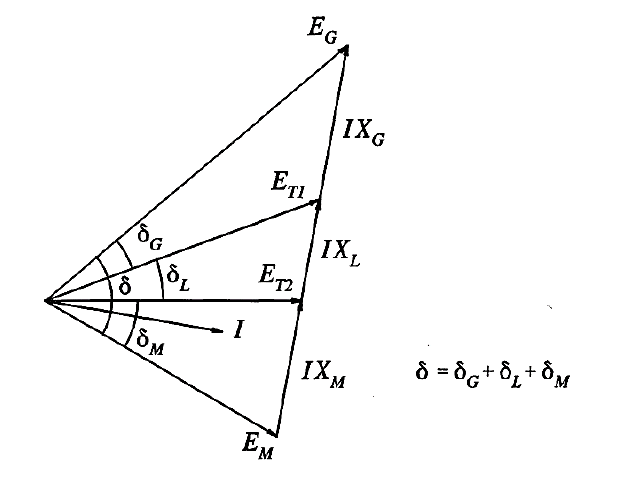
زمانی که بيش از دو ماشين وجود داشته‌باشد، موقعيت نسبی روتورها نسبت به هم بر تبادل توان به طور مشابه تأثير می‌گذارند. با وجود اين، مقادير حداکثر توان‌های مبادله شده و اختلاف زوايا تابعی پيچيده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه 90 درجه بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشینه محدود کننده بود) به خودی خود هيچ اهميت مشخصی ندارد.



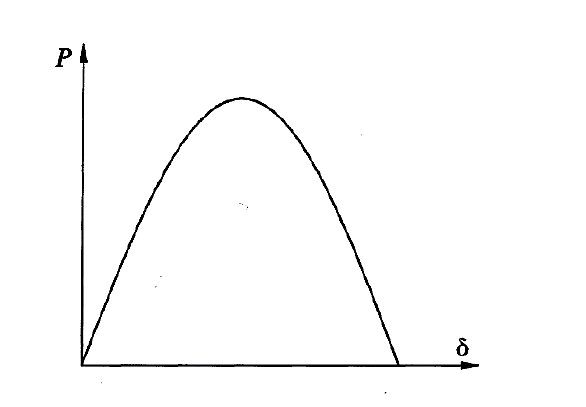
شکل(2-1): نمودار تک خطی یک سیستم دو ماشینه



شکل(2-2): مدل ایده آل یک سیستم دو ماشینه



شکل(2-3): نمودار فازوری یک سیستم دو ماشینه



شکل(2-4): منحنی توان-زاویه یک سیستم دو ماشینه

2-3 پديده پايداری

پايداری، حالت تعادل بين نيروهای متضاد را نشان می‌دهد. مکانيزمی که به وسيله آن ماشين‌های سنکرون به هم پيوسته، حالت سنکرون را بين يکديگر حفظ می‌کنند. این نيروهای بازيافت هستند که، زمانی که نيروهايی وجود داشته باشد تا يک يا چند ماشين را نسبت به ساير ماشين ها شتاب مثبت يا منفی دهند، عمل می‌نمايد . در حالت ماندگار، تعادل بين گشتاور مکانيکی ورودی و گشتاور الکتريکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می‌ماند. اما اگر سيستم دستخوش تغيير شود اين تعادل از بين می‌رود و در نتيجه روتور ماشين‌ها بر اساس قوانين حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت يا منفی پيدا می‌کند. . اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به ديگری سريعتر بچرخد، موقعيت زاويه‌ای روتور آن نسبت به ماشين کندتر، جلوتر قرار می‌گيرد. بسته به رابطه توان-زاویه، اختلاف زاويه بين روتور دو ماشين باعث می‌شود تا بخشی از بار ماشين کند به ماشين تند منتقل شود. اين موضوع سبب می شود که اختلاف سرعت و در نتيجه اختلاف زاویه روتورها کاهش يابد. همچنان که ذکر شد، رابطه توان-زاویه بشدت غير‌خطی است.

بالاتر از حد مشخصی، افزايش در اختلاف زاويه، باعث کاهش در توان مبادله شده می‌شود. اين موضوع سبب می‌شود که اختلاف زاویه باز هم بيشتر شود و منجر به ناپايداری گردد. در هر وضعيت بخصوص، پايداری سيستم به اين بستگی دارد که آيا انحرافات زوايای روتور ماشين‌ها منجر به گشتاورهای بازيافت کافی می‌شود يا خير. زمانی که يک ماشين سنکرون، حالت سنکرونيزه يا هماهنگ خود با ساير ماشین‌ها را‌از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر يا پايين‌تر از سرعتی که برای توليد ولتاژ در فرکانس سيستم لازم‌است، می‌چرخد. لغزش بين ميدان دوار استاتور (مربوط به فرکانس سيستم) و تحريک روتور منجر به تغييرات بزرگی در توان خروجی، جريان و ولتاژ ماشين می‌شود. اين موضوع باعث می‌شود که سيستم‌های حفاظتی، ماشين ناپايدار را از سيستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونيزه ممکن است بين يک ماشين و بقيه سيستم يا بين گروهی از ماشين‌ها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدایی گروه‌ها از يکديگر، بتوان حالت سنکرونيزه بين ماشين‌های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونيزه ماشين‌های سنکرون به هم پیوسته را می‌توان به مجموعه ای از خودرو‌هایی تشبیه کرد که به کمک تسمه‌های لاستیکی به يگديگر متصل شده‌اند و در يک مسير دايره‌وار می‌چرخند. روتور ماشين‌های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبيه شده است. زمانیکه خودرو‌ها با يکديگر هم نوا و هم سرعت باشند تسمه‌های لاستيکی دست نخورده باقی می‌‌مانند. زمانی که نيروی يکی از خودرو‌ها افزايش يابد، سرعت آن نيز موقتاً افزايش می‌يابد. اين موضوع باعث می‌شود که تسمه متصل به آن کش بياید که درنتيجه سرعت آن کاهش و سرعت ساير خودروها افزايش می‌يابند. بدين ترتيب عکس العملی زنجيروار اتفاق می‌افتد تا مجدداً تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طريق دهند. اگر نيروی وارده به يکی از تسمه‌ها از حد توانايی آن بيشتر شود، پاره می‌شود و باعث می‌شود که يک يا چندين خودرو از ساير خودروها جدا شوند.

در سيستم‌های قدرت می‌توان با بروز اغتشاش، تغييرات گشتاور الکتريکی يک ماشين سنکرون راطبق فرمول(2-3) به دو مؤلفه تجزيه کرد.

(2-3)

TSΔδمؤلفه‌ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویه روتور،Δδ، هم فاز است و از آن به نام مؤلفه گشتاور سنکرون‌کننده یاد می‌شود.TS، ضریب گشتاور سنکرون‌کننده است.TDΔωمؤلفه‌ای از تغييرات‌گشتاور است که با تغييرات سرعت، Δω، همفاز است و از آن به نام مؤلفه گشتاور میرا کننده یاد می‌شود.TD ، نیز ضریب گشتاور میرا‌کننده است.

پايداری سيستم بستگی به وجود هر دو مؤلفه گشتاور برای هر ماشين سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون‌کننده منجر به ناپايداری از طريق رانش غير نوسانی زاويه روتور می‌شود. از طرف ديگر، کمبود گشتاور ميرا‌کننده هم منجر به ناپايداری نوسانی می‌شود.

به منظور سهولت در امر بررسی پايداری و کسب نگرشی مفيد بر طبيعت مسائل پايداری، مناسب است که پدیده پايداری زاويه روتور را بر حسب دو طبقه‌بندی ذيل، تقسيم کرد:

**الف) پايداری اغتشاش کوچک يا سيگنال کوچک** : توانايی سيستم را برای حفظ حالت سنکرونيزه در اثر اغتشاش‌های کوچک نشان می‌دهد. اين اغتشاش‌ها به علت تغييرات کوچک بار و توليد، دائماً اتفاق می‌افتد.

اغتشاش‌ها را می‌توان به اندازه کافی کوچک به حساب آورد تا اجازه خطی‌کردن معادلات سيستم را برای بررسی پايداری داشته باشيم. ناپايداری که ممکن است اتفاق بيفتد می‌تواند به دو صورت باشد: يکی اينکه زاويه روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده مدام افزايش يابد و ديگری حالتی که به علت کمبود توان ميرا کننده، نوسان‌های روتور با دامنۀ در حال افزايش اتفاق افتد. عکس‌العمل سيستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطۀ کار اوليه، قدرت سيستم انتقال و نوع سيستم کنترل تحريک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به يک سيستم قدرت بزرگ متصل است، ناپايداری در غياب تنظيم‌کننده‌های خودکار ولتاژ (AVR) (يعنی با ولتاژ تحريک ثابت) ، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می‌افتد. این مسأله منجر به ناپایداری غیرنوسانی می‌شود. با وجود تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پايدار است که اطمينان حاصل شود نوسان‌های سيستم ميرايی کافی دارند. ناپایداری معمولاً خود را به صورت نوسان‌هایی با دامنه در حال افزایش نشان می‌دهد.

در سيستم‌های قدرت امروزی، پايداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود ميرايی نوسان‌ها اتفاق می‌افتد.در بحث پايداری انواع نوسان‌های زير مورد توجه است:

**-‌مد‌های محلی يا مد‌های ماشين**: سيستم که مربوط به نوسان‌های واحد‌های يک نيروگاه نسبت به بقيه سيستم‌قدرت است. واژه محلی به اين علت استفاده می‌شود که نوسان‌ها به يک نيروگاه يا بخشی کوچک از‌سيستم قدرت محدود می‌شود.

**-مد‌های بين ناحيه‌ای**: این مدها مربوط به نوسان‌های تعدادی ماشين سنکرون در يک بخش سيستم نسبت به ماشين‌های سنکرون ساير بخش‌هاست. اين مدها زمانی اتفاق می‌افتد که دو يا چند بخش که هر بخش از‌تعدادی ماشين سنکرون کاملاً نزديک به هم متصل تشکيل شده است، به وسيله خطوط ارتباطی ضعيف به هم متصل شده باشند.

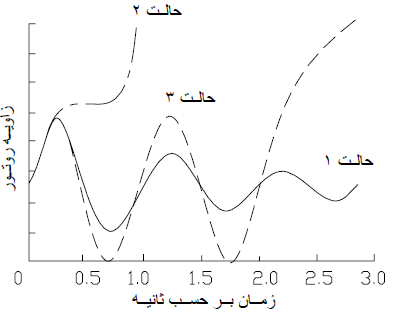
**-مد‌های کنترلی**:این مدها مربوط به کنترلگرهای نيروگاه و سایر کنترلگرهاست. معمولاً در صورتیکه سیستم های تحریک، گاورنرها، کانورتورهایHVDC و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو(SVC) ، بد تنظیم شده باشند، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می‌افتد.

**-مدهای پيچشی:** این مدها مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین-ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترلگرهای HVDC و خطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده‌اند، اتفاق ‌افتد.

**ب) پايداری گذرا:** توانايی سيستم را به منظور حفظ حالت سنکرونيزه در اثر بروز يک اغتشاش شديد گذرا نشان می‌دهد. عکس العمل سيستم، شامل تغییرات بزرگ زاويه روتور ژنراتور است و از رابطه غير خطی توان-زاویه تأثير می‌پذيرد. پايداری، هم به نقطه کار اوليه سيستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد.‌معمولاً در اين حالت، سيستم دستخوش تغيير می‌شود به گونه‌ای که نقطه کار حالت ماندگار سيستم بعد از اغتشاش با نقطه کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سيستم ممکن است اغتشاش‌هايی با شدت درجات و احتمال وقوع بسيار متفاوت روی دهد. با وجود اين، سيستم به گونه ای طراحی می‌شود که در مقابل مجموعه ای از پيشامدهای برگزيده، پايدار بماند. اين پيشامدها، عمدتاً اتصال‌کوتاه فاز به زمين، فاز به فاز به زمين و سه فاز است. معمولاً اتصال‌کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می‌کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شين يا ترانسفورمر نيز در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که به وسيله کليد زنی لازم، بخشی که تحت تأثير خطا واقع شده از بقيه سيستم جدا می‌گردد. در بعضی شرايط، می‌توان باز بست سريع را فرض کرد.

شکل (2-5) رفتار ماشين سنکرون را در وضعيتهای پايدار و ناپايدار نشان می‌دهد. اين شکل، عکس العمل زاويه روتور را برای يک حالت پايدار و دو حالت ناپايدار نشان می‌دهد. در حالت پایدار (حالت١) زاويه روتور ابتدا افزايش يافته، به حداکثر خود می‌رسد و سپس کاهش يافته و با دامنه در حال کاهش به صورت نوسانی در می‌آيد تا اينکه به حالت ماندگار می‌رسد. در حالت 2، زاويه روتور به طور پيوسته و يکنوا افزايش‌می‌يابد‌ تا اينکه حالت سنکرون از دست برود. اين شکل ناپايداری موسوم به ناپايداری اولين نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ايجاد می‌شود. در حالت 3، سيستم ابتدا در اولين نوسان پايدار است اما با افزايش دامنه نوسان ها، تدريجا ًناپايدار می‌شود. اين شکل از ناپايداری عموماً زمانی اتفاق می‌افتد که شرايط حالت ماندگار سيستم بعد از خطا، خود از ديدگاه "سيگنال کوچک " ناپايدار است و لزوماً به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی‌افتد.



شکل(2-5): پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

در سيستم‌های قدرت بزرگ، ممکن است ناپايداری گذرا هميشه به صورت ناپايداری اولين نوسان بروز نکند بلکه می‌تواند به علت جمع آثار چندين مد نوسانی باشدکه باعث تغييرات شديد زاويه روتور بعد از اولين نوسان می‌شود. در مطالعات پايداری گذرا، زمان مطالعه معمولاً محدود به ٣ تا ۵ ثانيه بعد از اغتشاش می‌شود هر چند که ممکن است برای سيستم‌های بسيار بزرگ با مد‌های نوسانی بين ناحيه‌ای غالب، این زمان به 10 ثانیه هم برسد.

از واژه پايداری ديناميکی نيز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پايداری زاويه روتور ياد شده است. با وجود اين، نويسندگان مختلف از اين واژه برای جنبه های متفاوت پديده استفاده کرده‌اند. در امريکای شمالی، از اين واژه به همان معنای پايداری سيگنال کوچک با وجود تجهيزات کنترل خودکار (عمدتا تنظيم‌کننده‌های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پايداری بدون وجود اين تجهيزات ياد شده است]4و5[. در فرانسه وآلمان، از اين واژه به همان معنای پايداری گذرا، که در اينجا استفاده شده است ياد گرديده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده،هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نموده‌اند]6و7[.

2-4 مقدمه‌اي بر پايداري ولتاژ

با تغيير ساختار جديدي كه در سال‌هاي اخير در سيستم‌هاي قدرت پديد آمده كه باعث مي‌شود واحدهاي توليدي توان الكتريكي هرچه بيشتري را از خطوط انتقال عبور دهند، انتظار مي‌رود شاهد فروپاشي ولتاژ گسترده‌تر و بيشتر سيستم‌هاي قدرت باشيم. براي مثال عبور توان بيش از حد يك خط انتقال باعث افت ولتاژ بيش از حد و كاهش ظرفيت انتقال توان الكتريكي به بخش مشخصي از سيستم‌قدرت گردد.

2-4-1 تعریف پایداری ولتاژ

تعريف IEEE از پايداري ولتاژ عبارت است از توانايي يك سيستم قدرت در نگهداري ولتاژ دائمي در همه باس‌هاي سيستم بعد از بروز اغتشاش در شرايط مشخصي از بهره‌برداري. اغتشاش ممكن است خروج ناگهاني يكي از تجهيزات باشد يا افزايش تدريجي بار. هنگامي كه توان الكتريكي انتقالي به بار رو به افزايش است تا بتواند بار اضافه شده را تأمين كند (بار ممكن است مكانيكي، حرارتي يا روشنايي باشد) و هر دو مؤلفه يعني توان و ولتاژ قابل كنترل بمانند سيستم قدرت، پايداري ولتاژي خواهد بود و اگر سيستم بتواند بار‌الكتريكي را منتقل كند و ولتاژ از دست برود سيستم ناپايدار ولتاژ است. فروپاشي ولتاژ هنگامي رخ می‌دهد كه افزايش بار باعث غيرقابل كنترل شدن ولتاژ در ناحيه مشخصي از سيستم‌قدرت گردد. بنابراين ناپايداري ولتاژ در طبيعت خود يك پديده ناحيه‌اي است، كه مي‌تواند بصورت فروپاشي ولتاژ كلي بدل گردد بدون هيچ پاسخ سريعي.

2-4-2 موضوعات پایداری ولتاژ

1-آگاهي در مورد مشخصات بار كه از شبكه‌هاي قدرت بزرگ قابل دسترسي هستند.

2-روش‌هاي كنترل ولتاژ در ژنراتور‌ها، دستگاه‌هاي كنترل توان راكتيو (مانند خازن‌هاي موازي، راكتورها) در شبكه.

3-توانايي شبكه در انتقال قدرت، به خصوص توان راكتيو، از نظر توليد به نقاط مصرف.

4-هماهنگي بين رله‌هاي حفاظتي و ادوات كنترل سيستم قدرت.

2-4-3 ناپایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ

ناپايداري ولتاژ اغلب هنگامي رخ مي‌دهد كه بروز يك خطا،ظرفيت سيستم انتقال يك شبكه قدرت را كاهش مي‌دهند. پس از بروز اين خطا، به سرعت مصرف بارهاي حساس به ولتاژ افت مي‌كند به دلیل اینکه كه ولتاژ افت كرده است.

اين كاهش بارگيري بصورت موقتي باعث مي‌شود كه سيستم‌قدرت پايدار بماند. به هر حال با گذشت زمان توان مصرفي بارها افزايش خواهد يافت چرا كه بسياري از بارها بصورت دستي يا اتوماتیک كنترل مي‌شوند تا بتوانند نيازهاي فيزيكي ويژه و تعيين شده‌اي را برآورده كنند و همچنين تپ ترانسفورماتورهاي قدرت به گونه‌اي تغيير خواهند‌كرد تا بتوانند ولتاژ مورد نياز را تأمين نمایند. اگر ولتاژ در سمت اوليه ترانس (ولتاژ سيستم انتقال) مقدار مطلوب را نداشته باشد و از حد مطلوب پایين‌تر باشد هنگامي كه بار به مقدار اوليه خود (قبل از بروز خطا) دست يابد، ممكن است سيستم‌قدرت وارد مرحله ناپايداري ولتاژ گردد كه زمينه فروپاشي ولتاژ نيز هست. در خلال اين مرحله بهره‌برداران (Operators) سيستم‌قدرت ممكن است كنترل ولتاژ و پخش بار در شبكه را از دست بدهند.

ممكن است توان راكتيو خروجي ژنراتورهاي سيستم قدرت كاهش يابد تا از حرارت بيش از حد آن‌ها جلوگيري به عمل آيد، اين كار باعث مي‌گردد ذخيره توان راكتيو سيستم قدرت كاهش يابد و از دست برود. از طرفي با كاهش يافتن ولتاژ، موتورها از حركت باز مي‌مانند كه خود باعث مصرف توان راكتيو بسياري مي‌گردد كه نهايتا اين امر فروپاشي كامل ولتاژ را در پي دارد،که درمورد این مسأله به صورت مفصل در فصل بعدی بحث خواهد شد.

از آنجايي‌كه واحدهاي توليدي در صدد انتقال توان هرچه بيشتر از خطوط انتقال هستند، وقوع فروپاشي ولتاژ محتمل‌تر است، چرا كه توان راكتيو مصرفي خط‌هايي كه بيش از حد بارگيري شده اند بيشتر است. تجهيزاتي كه بصورت پل به يكديگر متصل هستند و همچنين موتورهاي سرعت ثابت كه مقدار مشخصي توان مصرف مي‌كنند (حتي در مواقعي كه ولتاژ كاهش مي‌يابد) مي‌توانند به طور مؤثري سرعت بازگشت ولتاژ به مقدار اولیه را کاهش دهند. در پي انجام موارد فوق سيستم قدرت بصورت ناپايدار درخواهد آمد.

تغييردهنده‌هاي تپ بار اثر ناپايدار‌كننده مشابهي دارند. براي جبران كاهش ولتاژ در اوليه سيستم، آن‌ها با افزايش نسبت سعي در نگه داشتن ولتاژ ثانويه بصورت ثابت خواهد داشت. نتيجه این که ولتاژ در اوليه سيستم در قسمت ثانويه ظاهر نخواهد شد تا زماني كه LTC (Load Top Changer) به حد نهايي خود نرسد. علاوه بر موارد فوق عمل LTC سبب بروز افزايش توان راكتيو مصرفي در اوليه هم گردد، كه باعث ناپايداري ولتاژ اوليه سيستم مي‌گردد.

ادوات FACTS مانند SVCها و STAT COM ها مي‌توانند ظرفيت انتقال توان را با تأمين ولتاژ بصورت اكتيو افزايش دهند اما فقط براي يك نقطه. در انتهاي رنج كاري، يك تجهيز FACTS بطور ناگهاني توانايي خود را در كنترل از دست مي‌دهد و بصورت يك تجهيز ثابت عمل مي‌كند. توان راكتيو خروجي از يك خازن ثابت با كاهش ولتاژ نيز كم مي‌شود (معمولا با توان دوم ولتاژ ) بدون كنترل ولتاژ راكتيو، ولتاژ خط پايدار باقي نمي‌ماند يا اينكه به نقطه‌اي كه فروپاشي ولتاژ در آن رخ مي‌دهد نزديكتر مي‌گردد نسبت به موقعي كه كنترل ولتاژ اكتيو صورت مي‌گرفت.

به عبارت ساده‌تر، يك فروپاشي ولتاژ هنگامي رخ می‌دهد كه مقدار توان راكتيو قابل كنترل كافي وجود ندارد و در دسترس نيست تا بتوان توان راكتيو مورد نياز سيستم‌قدرت و مصرف كننده را تأمين نمود. اگر اين نقصان در توان راكتيو به اندازه كافي بزرگ باشد، ولتاژ سيستم كاهش خواهد يافت تا سطحي كه برگشت به حالت اوليه غيرممكن گردد.

يك عامل محرك يا آغازگر مورد نياز است تا فروپاشي ولتاژ واقع گردد. براي مثال ممكن است يك خط انتقال كه نقش كليدي در شبكه ايفا مي‌كند ممكن است به علت بروز خطا از سرويس خارج گردد. از آنجايي كه خطوط باقي مانده سعي در انتقال و جبران توان اكتيو و راكتيو مورد نياز دارند، كمبود توان راكتيو بيشتر شده و ولتاژ سطح پايين‌تري را به خود اختصاص مي‌دهد. همچنان كه كمبود توان راكتيو افزايش يابد، كاهش سطح ولتاژ بيشتر شده و خطوط بيشتري شامل خطا مي‌شوند. در اين شرايط بروز فروپاشي ولتاژ ناحيه‌اي يا كلي امري طبيعي است.

انواع مختلف فروپاشی ولتاژ در زیر آمده است:

**1-فروپاشي ولتاژ در درازمدت:** اين نوع فروپاشي هنگامي رخ مي‌دهد كه ژنراتورها و توليد‌كننده‌هاي توان الكتريكي از منابع بار بسيار دور هستند و خطوط انتقال به ميزان زياد بارگيري مي‌شوند و سيستم نمي‌تواند ولتاژ قابل قبول را بر روی بار ارائه دهد. هنگامي كه سيستم نمي‌تواند به مقدار كافي توان راكتيو به منطقه بار انتقال دهد، براي مثال، وقتي با كاهش توليد یا انتقال مواجه هستيم فروپاشي ولتاژ مي‌تواند حادث گردد. ممكن است بروز اين فروپاشي ولتاژ از چند دقيقه تا چند ساعت به طول بينجامد.

**2- فروپاشي ولتاژ كلاسيك:** اين مورد هنگامي رخ مي‌دهد كه در يك سيستم‌قدرت به هم پيوسته با توليد پراكنده يك خطا باعث جدا شدن سيستم گردد و سيستم قدرت داراي ذخيره توان راكتيو كافي نباشد تا بتواند نيازهاي سيستم و مصرف‌كنندگان را تأمين كند. هر چقدر كمبود توان راكتيو بيشتر باشد كاهش ولتاژ نيز بيشتر خواهد بود. نهايتاً ولتاژ به نقطه اي مي‌رسد كه بازگشت به حالت اوليه امكان پذير نمی‌باشد و سيستم دچار فروپاشي مي‌گردد. اين واقعه مي‌تواند بين ۱ تا ۵ دقيقه بعد از بروز خطا رخ دهد.

**3-فروپاشي ولتاژ گذرا:** دو دسته فروپاشي در اين قسمت وجود دارد، اما هر دو كمتر از ۱۵ ثانيه بعد از بروز اغتشاش رخ مي‌دهند. فروپاشي ولتاژ سريع مي‌تواند توأم با كاهش سنكرونيزم باشد يا اينكه فروپاشي هنگامي رخ می‌دهد كه تعداد زيادي از موتورها با هم از كار بيفتند و بخواهيم همه را با هم دوباره به راه بياندازيم. اين مورد مي تواند منجر به مصرف توان راكتيو زيادی گردد و فروپاشي ولتاژ را در پي دارد.

2-4-4 مفاهیم اساسی مربوط به پایداری ولتاژ

پايداری ولتاژ عبارت است از توانايی سيستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شين‌های سيستم در شرايط عادی عملکرد و بعد از اينکه تحت يک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزايش تقاضای بار، يا تغيير در وضعيت سيستم باعث افت فزاينده و غير قابل کنترل در ولتاژ گردد سيستم وارد حالت ناپايداری ولتاژ می‌شود. دليل اصلی ناپايداری، عدم توانايی سيستم قدرت در تأمين توان راکتيو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولا افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقيقی و راکتيو از راکتانس های خطوط انتقال ايجاد می‌گردد]8و9و10[.

يکی از معيا‌رهای پايداری ولتاژ آن است که در وضعيت کاری خاصی، در هر شين سيستم و در زمانی که توان راکتيو تزريقی به آن شين افزايش می‌يابد، دامنه ولتاژ نيز افزايش يابد. سيستم، از ديد ولتاژ، ناپايدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن (Q) ،باعث کاهش دامنه ولتاژ آن (V) شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار است که حساسیت V-Q آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت فزاینده در ولتاژ شين ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونيزه و افزايش زاويه روتور نيز صورت پذيرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدريجی حالت سنکرونيزه ماشين‌ها، زمانی که زوايای روتور بين دو گروه از ماشین‌ها به 180 درجه نزديک شده يا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژهای بسيار پايين در نقاط واسطه ای از شبکه می‌شود. در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپايداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می‌افتد که از نظر پایداری زاویه روتور مشکلی وجود نداشته باشد.

اساساً ناپايداری ولتاژ يک پديده محلی است. با وجود اين، آثار آن ممکن است تأثير فراگير داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پديده‌ای پيچيده‌تر از ناپايداری سادۀ ولتاژ است و معمولا اثر رشته‌ای از حوادث ناپايداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پايين در بخش عمده ای از سيستم‌قدرت می‌شود.

ناپايداری ولتاژ ممکن است به صورت های مختلفی بروز کند. در ساده‌ترين شکل، موضوع را می‌توان با توجه به شبکه ساده شکل (2-6) نشان داد]8[. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ (ES) است که باری (ZLD) را از طریق یک امپدانس سری (ZLN) تغذیه می‌کند.این شبکه نمونه‌ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه‌ای از بارها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می‌شود. جریان Ĩ درشکل (2-6) طبق فرمول (2-4) محاسبه می‌گردد.

(2-4)

که و مقادیر فازوری هستند و داریم:

دامنه جریان برابر است با:

(2-5)

که این رابطه را به صورت زیر هم می‌توان بیان کرد:

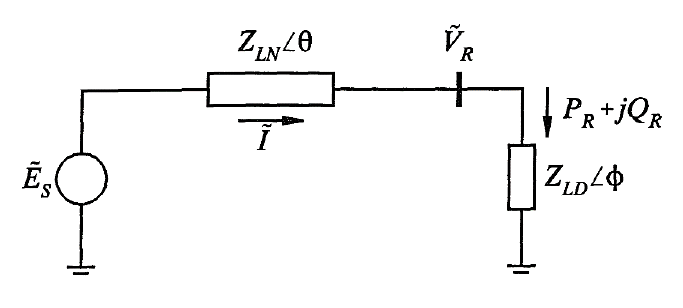
(2-6)

که:

(2-7)

دامنه ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با:

(2-8)

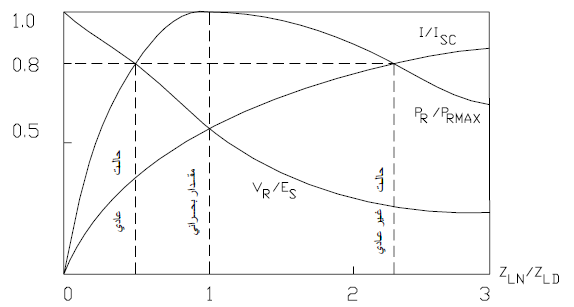


شکل(2-6): یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ

و توان حقیقی بار برابر است با:

(2-9)

نمودار I و و برحسب برای حالتیکه و است در شکل (2-7) رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار به کار برد، مقادیر I و و به طور مناسبی نرمالیزه شده‌اند.

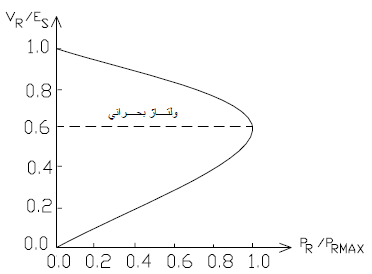
**

شکل(2-7): ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای بار برای سیستم شکل(2-6)

اگر با کاهش **،** بار مصرفی را افزایش دهیم**،** قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریع و سپس کند افزایش می‌یابد و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند.از این رو مقدار حداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می‌توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طریق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط،از نظر مقدار مساوی ، باشد یعنی زمانی که است.زمانی که رفته رفته کاهش یابد، I زیاد می‌شود و V کم می‌گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش ، سریعاً افزایش می‌یابد. زمانی‌که به نزدیک شد، تاثیر کاهش در I کمی بیشتر از تأثیر کاهش در است. زمانیکه کمتر از باشد، کاهش در بر افزایش I غالب می‌شود که در نتیجه، تأثیر خالص آن، کاهش است.

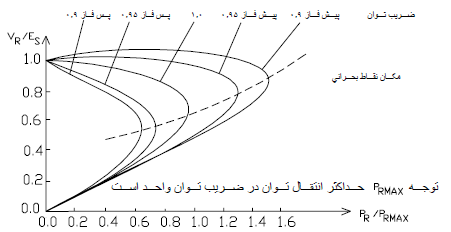
*حالت بحرانی کاری که در آن توان*، حداکثر است، حد بهره برداری قابل قبول را نشان می‌دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیله تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امپدانس بار منجر به کاهش توان می‌شود.اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده‌ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه‌های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می‌شود. از طرفی اگر مشخصه بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فروپاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می‌شود. با مشخصه‌های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه های خط انتقال و بار، تعیین می‌گردد. اگر بار به وسیله ترانسفورمرهایی با وجود تغییر‌دهنده‌های خودکار تپ زیر بار(ULTC) تغذیه شود، تغییردهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می‌شود که مؤثر از دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می‌شود باز هم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزاینده ولتاژ شود. این موضوع، شکل ساده و خالص ناپایداری ولتاژ است.

از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطه بین و مورد توجه است. این رابطه در شکل (2-8) برای سیستم مورد مطالعه، زمانیکه ضریب توان بار مساوی 0.95 پس فاز است، نشان داده شده است.

**

شکل(2-8): مشخصه های توان-ولتاژ سیستم شکل(2-6)

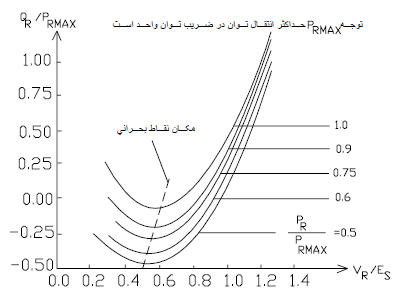
صورت‌های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل‌های (2-9) و (2-10) نشان داده شده است.شکل (2-9) منحنی‌های - را برای مقادیر مختلف ضریب‌توان در سیستم قدرت شکل (2-6) نشان می‌دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولا تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می‌دهند. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش ) می‌تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالا ناپایدار (در محدوده پایین منحنی‌ها) سوق دهد.



شکل(2-9): مشخصه های - مربوط به سیستم شکل(2-6) با ضریب های مختلف توان بار

تأثیر مشخصه‌های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیزات جبرانگر) بیشتر در شکل (2-10) نمایان است. این شکل، مجموعه‌ای از منحنی‌ها برای سیستم‌قدرت شکل (2-6) است که هر منحنی رابطه بین و را برای یک ثابت نشان می‌دهد. سیستم در محدوده‌ای که مشتق مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطه بحرانی) زمانی فرا‌می‌رسد که مشتق، صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی ها که در طرف راست نقطه حداقل قرار دارد، نمایانگر محدوده عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدوده ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده‌ای که منفی استو فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدوده کافی کنترلی با بهره بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیده پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف، کمک به طبقه بندی و درک جنبه‌های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسأله پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیده قدرت، عوامل زیادی به فرآیند فروپاشی ولتاژ سیستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می‌کنند. از آن جمله، می توان از توانایی سیستم انتقال، سطوح توان‌های انتقالی، مشخصه‌های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه های تجهیزات جبرانگر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله با عملکرد ناهماهنگ سیستم‌های گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می‌شود.



شکل(2-10): مشخصه های - مربوط به سیستم شکل(2-6) با نسبت های مختلف

2-5 انواع پایداری ولتاژ

تقسیم پایداری ولتاژ به دو دسته زیر سودمند است:

پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ و پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک. این دسته بندی، پدیده را به دو قسمت تفکیک می‌کند، قسمتی که باید با تحلیل دینامیک غیرخطی بررسی گردد و قسمتی که به کمک تحلیل حالت ماندگار بررسی می‌شود. این دسته بندی می‌تواند طراحی و کاربرد ابزار محاسباتی را ساده کند و به عنوان ابزاری در نظر گرفته شود که اطلاعات مکمل را فراهم می‌کند.

پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ، توانایی سیستم را در کنترل ولتاژ، به دنبال بروز اغتشاش‌های بزرگ، از قبیل: خطا‌های سیستم، از دست دادن بار، یا از دست دادن تولید، در نظر دارد. تعیین این صورت از پایداری، مستلزم بررسی عملکرد دینامیکی سیستم در دوره ای از زمان است که آن زمان، برای مطالعه تداخل بین وسایلی از قبیل ULTC ها و محدود‌کننده‌های جریان تحریک ژنراتور کافی باشد. پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ را می‌توان به کمک شبیه سازی های غیر خطی در حوزه زمان، که مدل‌سازی مناسبی را شامل می‌شوند، مطالعه کرد. می‌توان پایداری ولتاژ اغتشاش بزرگ را، به محدوده‌های زمانی گذرا و بلند مدت تقسیم کرد.

پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک، ناظر به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ، به دنبال بروز اغتشاش های کوچک از قبیل تغییرات تدریجی در بار است. این صورت از پایداری را می‌توان به طور مؤثر با روش‌های حالت ماندگار، که از خطی سازی معادلات دینامیکی سیستم در یک نقطه کار معلوم استفاده می‌کنند، مطالعه نمود.

به دنبال بروز اغتشاش، معمولاً ولتاژهای سیستم به سطح اولیه باز نمی‌گردند. بنابراین، لازم است ناحیه سطح ولتاژ قابل قبول، تعریف شود و سپس گفته می‌شود سیستم دارای پایداری محدود در ناحیه تعیین شده سطح ولتاژ می‌باشد.

2-5-1 تحلیل پایداری ولتاژ

تحلیل پایداری ولتاژ برای یک حالت معین سیستم، بررسی دو جنبه زیر را در بر می‌گیرد]11[:

**الف)نزدیکی به ناپایداری ولتاژ**، سیستم چه مقدار به ناپایداری ولتاژ نزدیک است؟فاصله تا ناپایداری را می‌توان بر حسب کمیت‌های فیزیکی، از قبیل سطح بار، عبور توان حقیقی در یک حد فاصل بحرانی و ذخیره توان راکتیو، اندازه گرفت. مناسب ترین میزان برای هر موقعیت مفروض، به سیستم مشخص و کاربرد مورد نظر حاشیهبستکی دارد، برای نمونه به برنامه ریزی در مقابل تصمیم‌های بهره برداری، بستگی دارد.

البته باید پیشامدهای احتمالی را نیز در نظر گرفت، مانند قطع خط، از دست دادن واحد تولید یا منبع توان راکتیو و غیره.

**ب)مکانیزم ناپایداری ولتاژ**، چرا و چگونه ناپایداری رخ می دهد؟عوامل کلیدی که در ناپایداری نقش دارند کدامند؟نواحی ولتاژ ضعیف کدامند؟چه اقدام‌هایی در بهبود پایداری ولتاژ مؤثر هستند؟

شبیه‌سازی‌های حوزه زمان، که در آن‌ها مدل‌سازی‌های مناسبی وارد شده باشند، رویدادها و روندشان را که منجر به ناپایداری شده است، نشان می‌دهد. لیکن، چنین شبیه سازی هایی وقت‌گیر هستند و به سادگی اطلاعات حساسیت و درجه پایداری را به دست نمی‌دهند.

معمولاً دینامیک‌های سیستم که بر پایداری ولتاژ تأثیر می‌گذارند، کند هستند. بنابراین، بسیاری از جنبه‌های مسأله را می توان به طور مؤثر با بکار‌گیری روش‌های استاتیکی تحلیل کرد، این روش‌ها قابلیت‌های نقطه تعادل نمایش داده شده به وسیله یک نقطه کار معین سیستم قدرت را بررسی می‌کنند. با استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی، می‌توان گستره وسیعی از وضعیت سیستم را بررسی کرد و اگر به طور مناسبی به کار گرفته شوند، می‌توانند دید بیشتری را از ماهیت مسأله مورد نظر به دست داده و عوامل کلیدی مؤثر بر ناپایداری را شناسایی کنند. از طرف دیگر، تحلیل دینامیکی برای مطالعه تفصیلی موقعیت‌های معین فروپاشی ولتاژ، هماهنگی حفاظت و کنترل‌ها، و آزمون اقدامات چاره‌ساز سودمند است. شبیه‌سازی‌های دینامیکی، همچنین این موضوع را بررسی می‌کنند که آیا سیستم به نقطه تعادل حالت ماندگار می‌رسد، و در صورت مثبت بودن پاسخ، چگونگی رسیدن به آن را نیز بررسی می‌کنند.

به منظور بررسی کامل پایداری ولتاژ به تفصیل دو قسمت آن می‌پردازیم:

**الف) پايداری اغتشاش بزرگ ولتاژ**،مربوط به توانايی سيستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش‌‌ها بزرگ از جمله خطاهای سيستم، از دست دادن توليد يا پيشامدهای خطوط است. اين توانايی به وسيله مشخصه‌های بار سيستم و تأثير متقابل سيستم‌های کنترلی و حفاظت پيوسته و گسسته مشخص می‌شود. تعيين پايداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غير‌خطی دينامیکی سيستم در محدوده زمانی کافی که تأثير متقابل محدود‌کننده‌های جريان تحريک ژنراتور و تجهيزاتی از قبيل تغيير‌دهنده های تپ زير بار(ULTC) مشخص می‌شود، تعيين گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانيه تا چندين دقيقه طول‌بکشد. از اين‌رو شبيه‌سازی ديناميکی بلند مدت برای بررسی مسأله، ضروری است. معياری جهت پايداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل کننده‌های سيستم، ولتاژ تمام شين‌ها به سطوح ماندگار قابل قبول برسند.

**ب) پايداری اغتشاش کوچک ولتاژ**، مربوط به توانايی سيستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش‌های کوچک، مثلاً تغييرات کوچک در بار سيستم، است. اين نوع پايداری به کمک مشخصه‌های بار، کنترل‌کننده‌های پيوسته و کنترل‌کننده‌ های گسسته در يک لحظه زمانی مشخص، تعيين می‌گردد. اين مفهوم، مشخص می‌کند که در هر زمان سيستم چگونه در مقابل اغتشاش های کوچک،عکس العمل نشان می‌دهد.

فرايند‌های اصلی که به پايداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می‌کند اساساً دارای طبيعت حالت ماندگار هستند. از اين رو می‌توان به طور مؤثر از بررسی استاتيکی برای تعيين حاشيۀ پايداری، عوامل مؤثر بر پايداری و مطالعه تأثير محدوده وسيعی از وضعيت‌های سيستم و تعداد زيادی سناريو که به دنبال پيشامدها و اغتشاشات رخ می‌دهند، استفاده کرد]12[.

معياری جهت پايداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در يک حالت کاری مشخص، دامنۀ ولتاژ هر شين سيستم، زمانی که توان راکتيو تزريقی به آن شين افزايش می‌يابد، زياد شود. سيستم، از نظر ولتاژ، ناپايدار است اگر حداقل در يک شين سيستم، دامنۀ ولتاژ (V) ،زمانیکه توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم شود.به عبارت دیگر،سیستم از نظر ولتاژ، پایدار است اگر حساسیت V-Q برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت V-Q حداقل برای یک شین، منفی باشد.

ناپايداری ولتاژ هميشه به شکل خالص خود بروز نمی‌کند. اغلب، ناپايداری ولتاژ و زاويه با يکديگر تداخل

می‌کنند. ناپايداری از يک نوع ممکن است به ناپايداری از نوع ديگر منجر شود و تفکيک، واضح و روشن نباشد.

**2-5-2 پايداری ميان‌مدت و بلند‌مدت**

واژه‌های پايداری بلند مدت و ميان‌مدت در فرهنگ پايداری سيستم‌های قدرت نسبتاًجديد هستند. اين واژه‌ها به دنبال نياز به بررسی عکس العمل ديناميکی سيستم قدرت در حالی که سيستم، دستخوش آشفتگی‌های شديد می‌شود، مطرح شده‌اند]11و13[. آشفتگی‌های شديد در سيستم منجر به تغييرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توان‌های انتقالی می‌شود و فرايندها، کنترل کننده‌ها و سيستم‌های حفاظتی کند را که در مطالعات سنتی پايداری گذرا، مدل نمی‌شوند به عکس العمل وا می‌دارد. مشخصه‌های زمانی فرايند ها و تجهيزات، که در اثر تغييرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحريک می‌شوند و از محدوده چند ثانيه (در‌خصوص تجهيزاتی از قبيل کنترل‌کننده‌ها و سيستم‌های حفاظتی ژنراتور) تا چند دقيقه (در خصوص تجهيزاتی از قبيل سيستم‌های تأمين انرژی چرخاننده‌ها و تنظيم‌کننده‌های بار-ولتاژ) متغير است]14و15[. در پايداری بلند‌مدت فرض می‌شود که نوسان‌های توان سنکرون‌کننده بين ماشين‌های سنکرون، ميرا شده است و در نتيجه فرکانس يکنواختی در کل سيستم برقرار است]6و16و17[. در اينجا تأکيد بر پديده‌های کندتر و بلند‌مدت‌تر است که همراه با آشفتگی های شديد سيستم ودر نتيجه عدم تطابق زياد و طولانی بين توليد و مصرف توان‌های حقيقی و راکتيو است. پديده‌ها شامل عکس‌العمل ديناميکی ديگ‌های بخار واحد‌های حرارتی، عکس‌العمل ديناميکی آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار توليد، کنترل‌کننده‌ها و سيستم‌های حفاظتی نيروگاه‌ها و سيستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر وتأثيرات فرکانس غير‌اسمی بر بار و شبکه است.

عکس العمل ميان مدت نمايشگر انتقال بين عکس العمل های کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پايداری ميان‌مدت، تأکيد بر نوسان‌های توان سنکرون‌کننده بين ماشين‌های سنکرون و از جمله تأثير بعضی از پديده‌های کندتر و احتمالاً تغييرات شديد ولتاژ يا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه‌های نوعی به این صورت که کوتاه مدت يا گذرا صفر تا ده ثانيه ،ميان مدت ده ثانيه تا چند دقيقه،‌ بلند مدت چندين دقيقه تا چندين ده دقيقه.

بايد خاطر نشان کرد که تمايز بين پايداری ميان مدت و بلند مدت عمدتاً بر اساس پديده‌های مورد بررسی و مدل‌سازی مورد استفاده سيستم بخصوص با توجه به نوسان‌های زودگذر و بين ماشينی و نه با توجه به دورۀ زمانی مورد نظر، صورت می‌پذيرد. به طور کلی مسائل پايداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس العمل تجهيزات، هماهنگی ضعيف بين سيستم‌های کنترلی و حفاظتی يا کمبود ذخيره توان‌های حقيقی و راکتيو اتفاق می‌افتد.

پايداری بلندمدت معمولاًمربوط به عکس العمل سيستم در مقابل اغتشاش‌های بزرگی است که از محدوده معيار‌های طراحی معمولی سيستم خارج است. اين موضوع ممکن است به وقفه‌های متوالی و پارگی سيستم به چندين زير سيستم منجر شود که در هر زير سيستم، ژنراتورها در حالت سنکرونيزه باقی بمانند. مفهوم پايداری در اين حالت آن است که " آيا هر زير سيستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار‌زدايی می‌رسد يا خير" . اين موضوع از عکس العملی کلی زير سيستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بين ماشين های سنکرون، تعيين می‌شود. در این وضع، ممکن است عکس العمل تجهيزات حفاظتی سيستم و واحدها وضعيت را باز هم بدتر کند و فروپاشی ولتاژ در سيستم يا بخشی از آن رخ دهد.

کاربردهای ديگر بررسی پايداری بلند‌مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی ديناميکی پايداری ولتاژ است که نيازمند به شبيه‌سازی تأثير تغيير‌دهنده‌های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحريک ژنراتورها، حدود منابع توان راکتيو و بارهای ترموستاتی است.

فصل سوم

تحلیل و شبیه‌سازی پدیده بازیافت ولتاژ تأخیری ناشی از وقوع خطا

3-1 مقدمه

حفاظت حذف بار ولتاژي يكي از اقدامات مؤثر جهت‌جلوگيري از فروپاشي ولتاژ در حوادث مهم شبكه است‌.در حال حاضرروش مورد استفاده براي تنظيم رله‌هاي حذف بار ولتاژي در شبكه انتقال‌برق ايران غالباً بر‌مبناي مدل استاتيكي بار بوده و لذا فاقد انعطاف وكارايي مطلوب در برابر رفتار ديناميكي بارهاي موتوري شبكه**(**به ويژه بارهاي كولري و سيستم‌هاي تهويه مطبوع كه رشد روزافزوني دارند**)** مي‌باشد. افزايش بارهاي موتوري شبكه در ساليان اخير منجر به وقوع پديده بازيافت ولتاژ تأخيري ناشي از وقوع خطا(FIDV) در‌‌نقاطي از شبكه انتقال برق ايران شده كه در طي آن، رله‌هاي حذف بار ولتاژي عملكرد نامطلوبي داشته و با عملكرد بي‌مورد باعث قطع مقادير زيادي بار و در مواردي حتي بروز اضافه ولتاژ در برخي از پست‌ها گرديده است.

در این فصل بااستفاده از آخرین مقالات ارائه شده و همچنین شبیه‌سازی به وسیله نرم‌افزار ETAP v12.6 به تحلیل و بررسی پدیده بازیافت ولتاژ تأخیری ناشی از وقوع خطا در شبکه و تأثیر بار‌های استاتیکی و دینامیکی بر آن پرداخته می‌شود.

امروزه پدیدهFIDVR به یکی از چالش­های مورد توجه مهندسان قدرت تبدیل شده­­است.این‌پدیده یکی از پدیده­های دینامیکی مرتبط با مبحث پایداری ولتاژ می‌باشد که با افزایش تعداد مصرف‌کننده­های موتوری متصل به شبکه که عموماً از نوع کولر­های گازی و تجهیزات تهویه مطبوع هستند ، تعداد وقوع آن در سیستم­های قدرت افزایش یافته‌است. طبق بررسی‌ها ، بارهای موتوری در مواقع خطا به علت مصرف جریان بالا یکی از عوامل اصلی کاهش سرعت بازیافت ولتاژ پس از رفع خطا می‌باشند. بازیافت ولتاژ می‌تواند سریع یا آهسته اتفاق‌ بیفتد که نوع سریع آن پایداری ولتاژ سیستم را حفظ می‌کند و این در حالی است که بازیابی ولتاژ آهسته می‌تواند موجب ناپایداری ولتاژ سیستم و آسیب رسیدن به تجهیزات گردد]18[.

1.Fault-Induced Delayed voltage Recovery

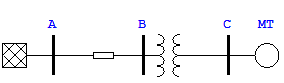
در این فصل برای درک بهتر وتحلیل دقیق‌تر رفتار بار‌ها در هنگام و پس از بروز خطا ،یک خطای سه‌فاز متقارن در یک شبکه شعاعی ساده شبیه‌سازی شده‌است و با استفاده از نتایج بدست آمده به بررسی این پدیده پرداخته می‌شود.

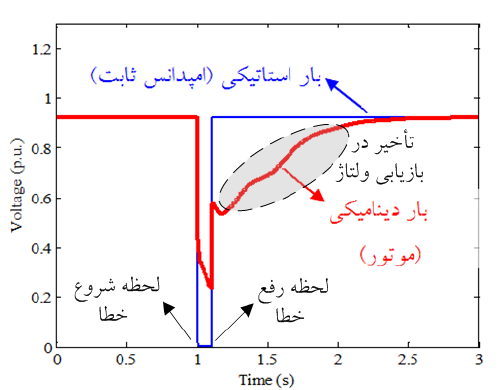
3-2 معرفی پدیده بازیافت ولتاژ تأخیری ناشی از وقوع خطا

وقوع اتصال‌كوتاه درخطوط انتقال يا تجهيزات شبكه، موجب مي‌شود ولتاژ در مدت زمان حضور خطا افت كرده و به زير مقدار نامي برسد. اين افت ولتاژ موجب كاهش گشتاور الكترومكانيكي توليدي موتور و در نتيجه كاهش سرعت آن مي‌گردد. اگر ولتاژ در مدت زمان حضور خطا به كمتر از 60 درصد ولتاژ نامي برسد، ممكن است برخي از موتورهاي‌القائي اصطلاحاً قفل شوند. پس از رفع و پاكسازي خطا، موتورهاي مذكور ممکن است دوباره شروع‌ به دو‌ر گرفتن وافزايش سرعت نموده و جريان راكتيوي زيادي (در حدود 6 برابر جريان نامي) از شبكه بكشند‌ و یا در همان حالت قفل باقی‌مانده و مصرف جریان بالا برای مدت طولانی‌تری ادامه پیدا‌ کند]19[.

تعداد زياد بارهاي موتوري و شروع به كار همزمان آن‌ها مي‌تواند باعث مصرف زياد توان راكتيو و افت مجدد ولتاژ شده و فرآيند بازيابي ولتاژ را با تأخير مواجه سازد. اين پديده به بازيافت ولتاژ تأخيري ناشي از خطا یا FIDVR معروف مي‌باشد. نمودار نوعي تغييرات ولتاژ در حين پديده FIDVR در شكل (3-1) نشان داده شده است.

برای تحلیل درست این پدیده احتیاج به مدل‌سازی درست و دقیق بارهای استاتیکی و دینامیکی در هنگام و پس از رفع خطا می‌باشد.در قسمت بعد خواهیم دید که اين رفتار دینامیکی ولتاژ ناشي از بارهاي موتوري بوده و دربارهاي‌امپدانسي و استاتيكي ديده نمي‌شود، اين موضوع اهميت مدل‌سازي بارهاي ديناميكي را در مطالعات پايداري سيستم نشان مي‌دهد.





شکل(3-1): رفتار ولتاژ هنگام وقوع پديده FIDVR در يك سيستم ساده

3-3 مدل‌سازی بار

همانطور که در ابتدا گفته شد برای تحلیل این پدیده ابتدا نیاز به مدل‌سازی درست المان‌های سیستم داریم که مهمترین آن مدل‌سازی بار می‌باشد. مدل‌سازی بار در واقع یک نوع نمایش ریاضی است که در آن رابطه بین توان و ولتاژ (یا فرکانس) مشخص می‌شود برای آنالیز پایداری ولتاژ معمولا بار‌ها ترکیبی از صورت دینامیک و استاتیک ارائه می‌شونددر زیر برخی ازمدل‌های استاتیکی معرفی شده است]20[.

**3-3-1 بار امپدانس ثابت**

در این نوع بار تغییرات توان با توان دوم اندازه ولتاژ رابطه مستقیم دارد به این نوع بار، بار ادمیتانس ثابت هم گفته می‌شود.

**3-3-2 بار جریان ثابت**

در این نوع بار تغییرات توان به صورت مستقیم با تغییرات اندازه ولتاژ متناسب است.

3-3-3 بار توان ثابت

در این نوع بار توان مصرفی با تغییرات ولتاژ تغییر نمی‌کند و ثابت است. (به دلیل اینکه اکثر بار‌های توان ثابت اعم از موتورها و ادوات الکترونیکی نمی‌توانند این ویژگی را در ولتاژ پایین حفظ کنند ودر نتیجه اکثر آن‌ها‌ در ولتاژ پایین(زیرpu 8/0) از توان ثابت به امپدانس ثابت تغییر می‌یابند و یا اینکه در این ولتاژاتصال بار از سیستم قطع می‌شود).

3-3-4 **مدل Polynomial**

در این مدل از بار رابطه بین توان و ولتاژ به صورت چند جمله‌ای با ضرائب ثابت بیان شده است.

(3-1) **P=**

(3-2) **Q=**

همانطور که در معادلات بالا دیده‌می‌شود این مدل حاصل جمع سه مدل قبلی می‌باشد از این رو به این مدلZIP نیز می‌گویند.

**3-3-5 مدل Exponential**

دراین مدل رابطه بین توان و ولتاژ به صورت معادله توانی می‌باشد که در زیر صورت کلی آن آورده شده است.

(3-3)

(3-4)

(با جای‌گذاری ثابت‌ها با مقادیر 0و1و2 در این مدل نیز می‌توان به سه مدل اول دست‌یافت).

3-3-6 مدل وابسته به فرکانس

در این مدل استاتیکی میتوان ضریبی را که طبق رابطه(3-5) خود تابعی از فرکانس است را در دو مدل **Polynomial** و**Exponential** ضرب نموده و مدل وابسته به فرکانس را بدست آورد.

(3-5)

طبق بررسی‌هایی که در ]20[ انجام گرفته است هیچ یک از مدل های استاتیکی فوق نمی‌توانند بازیافت آهسته ولتاژ پس از رفع خطا را ثبت‌کنند که این مطلب در قسمت بعدی که شبیه‌سازی خطا در یک شبکه شعاعی ساده می‌باشد مشاهده می‌گردد.

3-4 شبیه‌سازی خطای سه فاز متقارن روی یک شبکه شعاعی ساده و تحلیل آن

حال با استفاده از شبیه‌سازی خطا در یک شبکه نمونه داخل نرم‌افزار شبیه‌ساز ETAP v12.6 ابتدا اثبات می‌شود که در بخشی از سیستم که تجمع بارهای استاتیکی وجود دارد، امکان وقوع پدیدهFIDVR وجود نداشته و سپس به بررسی علت وقوع این پدیده در بخشی که در آن تراکم بار‌های دینامیکی بالا است پرداخته می‌شود. شبکه شعاعی مورد بررسی شامل دو بخش با بار‌های استاتیکی و دینامیکی می‌باشد که توسط یک شبکه قدرت که به صورت شناور در نظر گرفته شده است (Swing Mode) تغذیه می‌شوند.

**نکته:** ازاین پس به جای زیر شبکه با بارهای استاتیکی عبارت **"پست‌اول"** و به جای زیر شبکه با بارهای دینامیکی عبارت**" پست‌دوم"** استفاده می‌شود.

پست‌اول شامل بار‌های استاتیکی متنوع از نوع توان ثابت یا امپدانس ثابت می‌باشد، یک موتور القائی تقریباً کوچک نیز در این شبکه در نظرگرفته شده‌است اما وضعیت پست‌دوم کاملاً متفاوت است زیرا اکثر بارهای این پست از نوع دینامیکی می‌باشند.

برای شروع شبیه‌سازی ابتدا یک خطای سه فاز متقارن روی پست‌اول در نظر گرفته شده است تا تغییرات ولتاژ و توان مورد بررسی قرار گیرد سپس همین نوع خطا روی پست‌دوم صورت می‌پذیرد، پس از آن بااستفاده از نمودار‌های بدست‌آمده از متغیرهای الکتریکی و مکانیکی موتورها به تحلیل پدیده FIDVR پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است شبیه سازی در بخش مطالعات حالت گذرای نرم‌افزار انجام گرفته و کل مدت شبیه‌سازی **3 ثانیه** می‌باشد و مشخصات زمانی خطا به صورت جدول (3-1)می‌باشد.

جدول (3-1): مشخصات اتصال کوتاه

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| زمان رفع خطا | زمان وقوع خطا | مکان وقوع خطا | نوع خطا |
| 15/0 | 05/0 | بر روی پست اول | اتصال کوتاه سه فاز متقارن |
| 15/0 | 05/0 | بر روی پست دوم | اتصال کوتاه سه فاز متقارن |

**3-4-1 مشخصات شبکه**

برای دستیابی به نتایج دقیق و درست نیاز به شبیه سازی یک شبکه شعاعی ساده می‌باشد که به وسیله آن بتوان رفتار موتورها و همچنین ولتاژ باس‌های مختلف را پس از خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن مشاهده‌نمود، در جداول صفحات بعد مشخصات المان‌های مختلف این شبکه آورده شده است.

3-4-1-1 شبکه بالا دست()

جدول (3-2): مشخصات شبکه بالادست

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | قدرت اتصال کوتاه | ولتاژ نامی |  |
| 20 | MVA500 | Kv20 | شبکه بالا دست(U1) |

**3**-4-1-2 ترانسفورماتور قدرت ()

جدول (3-3): مشخصات ترانس‌های قدرت

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| R(pu)+jX(pu) | نوع اتصال | قدرت نامی | ولتاژ ثانویه نامی | ولتاژ اولیه نامی |  |
| 48/6 J+45/0 | ΔΥ | MVA8 | Kv6/6 | Kv20 | ترانس 1(T1) |
| 48/6 J+45/0 | ΔΥ | MVA8 | Kv6/6 | Kv20 | ترانس 2(T6) |

3-4-1-3 موتورها‌ی‌القائی ()

جدول (3-4): مشخصات موتور‌های القایی

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| مجموع اینرسی باروکوپلینگ(s) | لغزش در گشتاور ماکزیمم | لغزش نامی | سرعت نامی | LRC% | ضریب قدرت راه اندازی | ضریب قدرت نامی | ولتاژ نامی | توان نامی |  |
| 54/1 | 31% | 93/0% | Rpm1800 | 576% | 19.47 | 81/92 | 6/6Kv | Hp2000 | موتور1(Mtr1) |
| 25/1 | 38% | 58/1% | Rpm1800 | 453% | 81/14 | 32/88 | 6/6kv | Hp1000 | موتور2(Mtr2) |
| 12/1 | 29% | 58/1% | Rpm1800 | 453% | 81/14 | 32/88 | 6/6 kv | Hp500 | موتور3(Mtr3) |
| 10/1 | 29% | 93/0% | Rpm1800 | 650% | 89/18 | 08/92 | 6/6 kv | Hp500 | موتور4(Mtr4) |

3-4-1-4 موتور سنکرون()

جدول (3-5): مشخصات موتور سنکرون

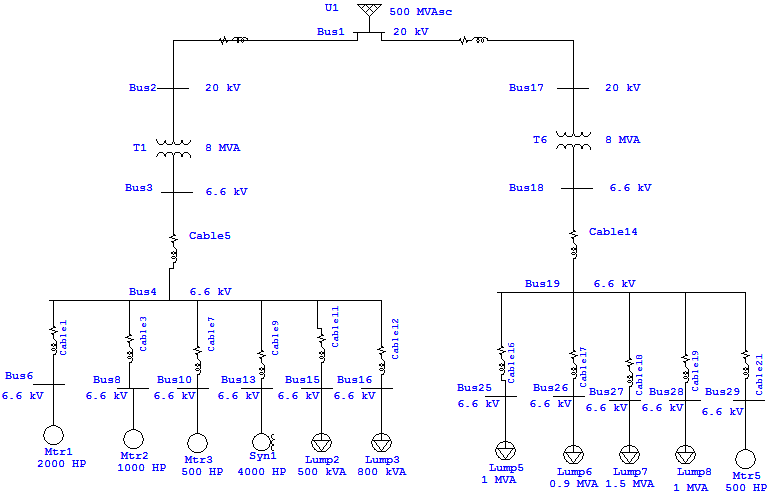
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| اینرسی باروکوپلینگ(s) | LRC% | ضریب قدرت راه اندازی | ضریب قدرت نامی | سرعت نامی | توان نامی | ولتاژ نامی |  |
| 44/2 | 650% | 61/10 | 94/92 | Rpm1800 | Hp4000 | Kv6/6 | موتور1 (syn1) |

**3**-4-1-5 بار‌های استاتیکی ()

جدول (3-6): مشخصات بارهای استاتیک

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| در صد بار امپدانس ثابت | درصد بار توان ثابت | ضریب توان نامی | توان نامی | ولتاژ نامی |  |
| 100 | 0 | 85 | KVA500 | Kv6/6 | بار استاتیک 1  (lump2) |
| 95 | 5 | 85 | KVA800 | Kv6/6 | بار استاتیک 2  (lump3) |
| 0 | 100 | 85 | KVA1000 | Kv6/6 | بار استاتیک 3  (lump5) |
| 10 | 90 | 85 | KVA900 | Kv6/6 | بار استاتیک 4  (lump6) |
| 23 | 77 | 85 | KVA1500 | Kv6/6 | بار استاتیک 5  (lump7) |
| 50 | 50 | 85 | KVA1000 | Kv6/6 | بار استاتیک 6  (lump8) |

**3-4-1-6 نمایش SLD شبکه شعاعی**



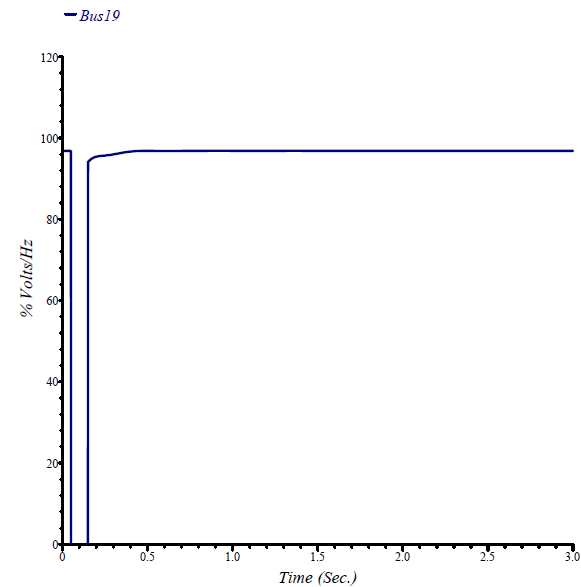
شکل(3-2): دیاگرام تک خطی شبکه شبیه سازی شده

3-4-2 اتصال کوتاه روی پست اول (باس 19)

در این بخش از شبیه‌سازی یک اتصال‌کوتاه سه‌فاز متقارن روی پست‌اول (باس19در دیاگرام تک خطی شبکه) که تجمع بار‌های استاتیکی روی آن زیاد است توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود و نتایج آن مورد تحلیل واقع می‌گردد.

3-4-2-1 ولتاژ پست اول

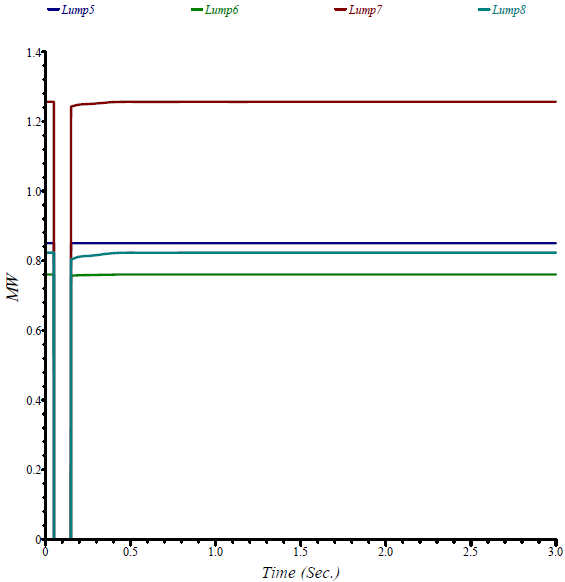
همانطور که در نمودار شکل(3-3) مشاهده می‌گردد هیچ گونه تأخیری در بازیافت ولتاژ پست اول پس از رفع خطا دیده نمی‌شود و بازگشت ولتاژ به مقدار اولیه سریعاً اتفاق افتاده است.

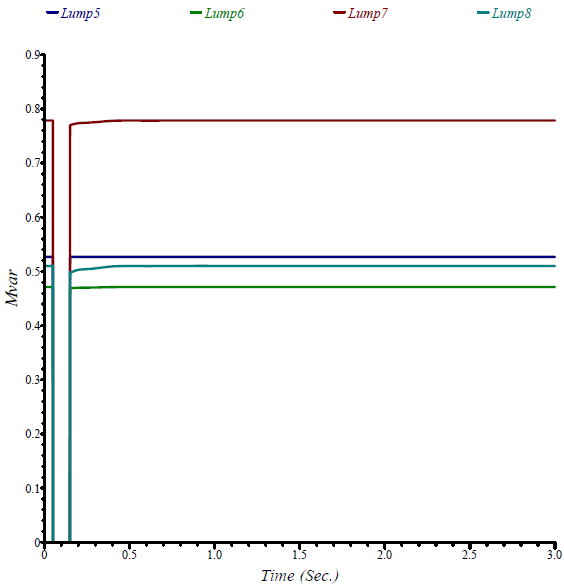


شکل(3-3): نمودار تغییرات ولتاژ در اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پست اول

3-4-2-2 توان اکتیوو راکتیو مصرفی بارهای استاتیکی

در نمودارهای شکل(3-4) می‌توان مشاهده نمود که پس از رفع خطا هیچ یک از بارهای استاتیکی توان اکتیو و راکتیو اضافی را مصرف نمی‌کنند و سریعاً به مقدار نامی خود بازمی‌گردند .

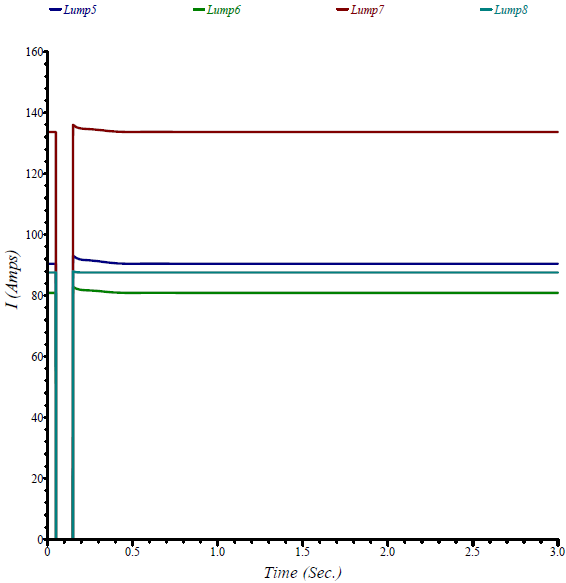
****



شکل(3-4): نمودار تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی بارهای استاتیکی

3-4-2-3 جریان مصرفی بارهای استاتیکی

با توجه به این که بارهای استاتیکی در هنگام رفع خطا هیچ توان اکتیو و راکتیو اضافی مصرف نمی‌کنند بنابراین بدیهی است که جریان مصرفی نیز بلافاصله پس از رفع خطا به حالت عادی بازگردد.شکل(3-5)

****

شکل(3-5): نمودار تغییرات توان راکتیو مصرفی بارهای استاتیکی

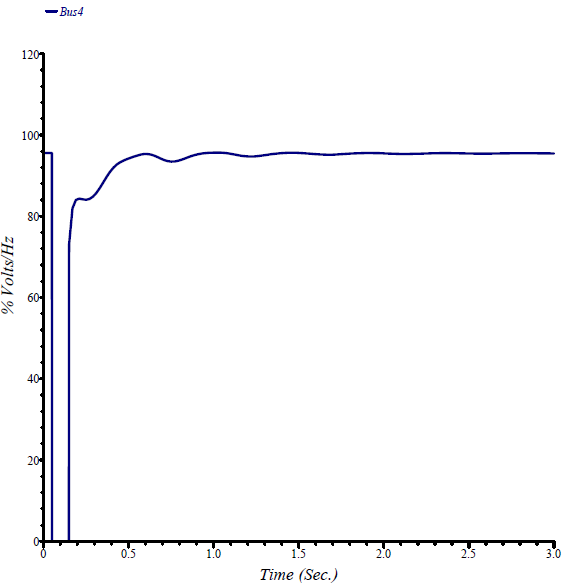
3-4-2-4 نتیجه شبیه‌سازی

همانطور که در قسمت‌های قبلی در مورد بارهای استاتیکی بحث شد، مشاهده می‌شود که در پست اول که اکثر بارهای آن از نوع استاتیکی می‌باشند به هیچ وجه پس از رفع خطا پدیده FIDVR رخ نمی‌دهد و توان‌های اکتیو و راکتیو و همچنین جریان مصرفی بارها پس از رفع خطا به سرعت به مقدار پیش از خطا باز می‌گردند و هیچ توان اکتیو و راکتیو اضافی مصرف نمی‌شود در نتیجه بازیافت ولتاژ پس از رفع خطا نیز به سرعت اتفاق می‌افتد.

3-4-3 اتصال کوتاه روی پست دوم (باس4)

در این بخش از شبیه‌سازی یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن روی پست دوم (باس4 در دیاگرام تک خطی شبکه) که تجمع بارهای دینامیکی روی آن بالا است توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود و نتایج آن مورد تحلیل واقع می‌گردد. در این قسمت ابتدا نمودار ولتاژ پست دوم مشاهده می‌گردد سپس برای تحلیل بهتر پدیده FIDVR سایر نمودارهای مربوط به موتور استخراج گردیده و مورد برسی قرار می‌گیرد.

3-4-3-1 ولتاژ پست دوم



شکل(3-6): نمودار تغییرات ولتاژ در اتصال‌کوتاه سه فاز متقارن در پست دوم

3-4-3-2 تحلیل ونتیجه‌گیری

از منحنی بدست آمده در شکل(3-6) مشاهده می‌شود که پس از رفع خطا روی پست دوم، بازیافت ولتاژ آهسته اتفاق می‌افتد این برداشت حاصل می‌گردد که پدیده FIDVR تنها روی باس‌هایی رخ می‌دهد که دارای تراکم بالای بارهای دینامیکی می‌باشند بنابراین از این پس توجه خودمان را به این پست معطوف نموده و به بررسی و تحلیل متغیر‌های گوناگون آن می‌پردازیم. برای این منظور ابتدا به بررسی رفتار بارهای موتوری در هنگام و پس از رفع خطا می‌پردازیم.

3-4-3-3 رفتار بار موتوری در هنگام کاهش ولتاژ

در این بخش به بررسی رفتار موتورهای‌القائی در هنگام کاهش ولتاژ پرداخته می‌شود دلیل بررسی این نوع موتورخاص این می‌باشد که اکثر موتورهای مورد استفاده در صنعت از نوع القائی می‌باشند و همچنین این نوع موتورها بر خلاف موتور های سنکرون توانایی تأمین توان راکتیو مورد نیاز خود را ندارند، به همین دلیل احتمال وقوع این پدیده در مناطقی که تجمع بالایی از این نوع موتورها وجود دارد به مراتب بیشتر از سایر مناطق می‌باشد. معادلات زیر معادلات پایه‌ای دینامیکی موتور القائی می‌باشند]20[.

(3-6)

´ (3-7)

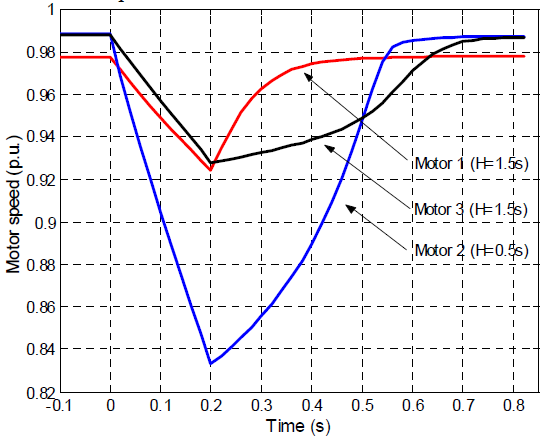
(3-8)

اینرسی = H سرعت سنکرون = جریان‌های استاتور =و

گشتاور بار = لغزش =s ثابت زمانی =

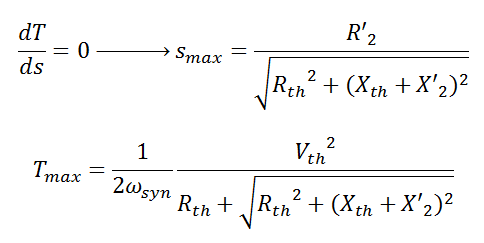
راکتانس گذرا = راکتانس سنکرون =

همانطور که از معادله (3-6) تا (3-8) مشاهده می‌گردد با کاهش ولتاژ ترمینال ،گشتاور تولیدی موتور کاهش می‌یابد در حالی که گشتاور بار ثابت است از این رو سرعت موتور شروع به کاهش می‌کند، البته همانطورکه‌درمعادله (3-8) مشخص است این کاهش سرعت به عواملی همچون اینرسی‌ وشدت خطا بستگی دارد]20[. به این صورت که هرچه اینرسی بار موتور کمتر باشد نرخ تغییرات سرعت موتور به مراتب بیشتر از حالتی است که اینرسی بار زیاد باشد. در شکل (3-7) مقایسه‌ای بین تغییرات سرعت سه موتور مشخص با اینرسی‌های متفاوت پس از خطا انجام شده است.



شکل(3-7): مقایسه نرخ تغییرات سرعت سه موتور با اینرسی های مختلف ،پس از وقوع خطا در ثانیه 0] 18[

همانطور که در شکل (3-8) قابل مشاهده است طبق فرمول (3-10) با کاهش ولتاژ ترمینال موتور ناشی از خطا در قسمتی از شبکه، منحنی گشتاور بر حسب لغزش به سمت پایین شیفت پیدا می‌کند تا جایی که منحنی گشتاور سرعت بار را در هیچ نقطه پایداری قطع نمی‌کند، در این زمان موتور با توجه به مقدار اینرسی بار خود با شتاب معینی شروع به کاهش سرعت کرده و این کاهش سرعت طبق فرمول (3-11) با افزایش لغزش همراه است.



(3-9)

(3-10)

(3-11) S=

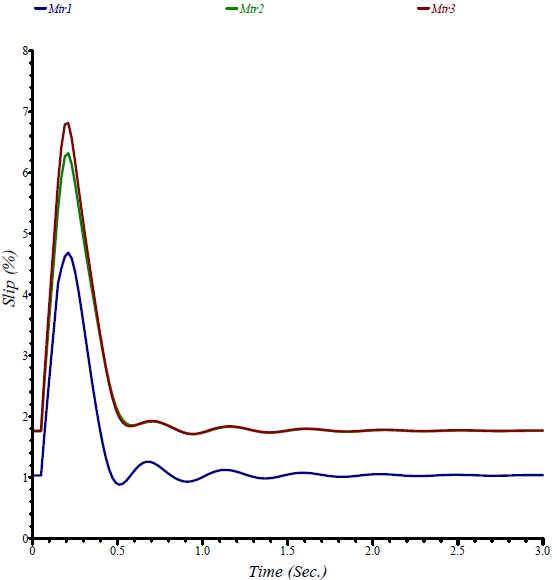


شکل(3-8): تغییرات منحنی گشتاور \_لغزش به واسطه کاهش ولتاژ.]21[

**نکته**:مصرف عمده موتورالقائی در بخش‌های خانگی،تجاری و صنعتی می‌باشد همچنین استفاده معمول از موتورهای‌القائی در مصارف خانگی و تجاری به چرخاندن کمپرسورهای تهویه هوا یا خنکسازی برمی‌گرددواینگونه بارها در تمامی سرعت‌ها دارای گشتاور ثابت می‌باشند و از دیدگاه پایداری باید توجه ویژه‌ای به این گونه بارها داشته باشیم.

از طرفی دیگر میزان استفاده از بارهای گشتاور ثابتی مثل فن‌ها ،پمپ‌ها و کمپرسورها بیش از 50 درصد کل استفاده از موتورهای القائی می‌باشد که این خود دلیل محکمی بر تحلیل بارهای گشتاور ثابت در مباحث پایداری ولتاژ می‌باشد.در این فصل نیز تمامی بارهای مکانیکی از نوع گشتاور ثابت فرض شده‌اند.

3-4-3-4 تغییرات لغزش هریک ازموتور‌های القایی پس از وقوع خطا

****

شکل(3-9): نمودار تغییرات لغزش در اتصال کوتاه سه فاز متقارن در پست‌دوم

3-4-3-5 تحلیل ونتیجه‌گیری

همانطور که گفته شد در هنگام کاهش ولتاژ سرعت موتور کاهش یافته و در نتیجه لغزش آن افزایش می‌یابد که شتاب کاهنده آن به اینرسی باری که روی موتور قرار دارد بستگی داشته و هرچه این اینرسی کمتر باشد شتاب کاهنده موتور بیشتر می‌شود.

همانطور که در مشخصات موتورهای‌القائی آورده شده است اینرسی موتورها به قرار زیر است:

بنابراین در منحنی نیز مشخص است که شتاب کاهنده موتور سوم بیشتر از موتور دوم و اول می باشد که دلیل آن همانطور که در قسمت قبلی بحث شد به تأثیر اینرسی بار در شتاب کاهنده موتور برمی‌گردد.

3-4-4 رفتار بار موتوری پس از رفع خطا

در بخش قبلی متوجه شدیم که با وقوع خطا و افت ولتاژ موتورالقائی سرعت آن شروع به کاهش می‌کند،از این پس دو حالت مختلف ممکن است رخ دهد:

حالت اول: قبل از اینکه لغزش موتور (S) به مقدار برسد خطا برطرف گردد.

حالت دوم: لغزش موتور پس از رفع خطا بیشتر از مقدار باشد.

3-4-4-1 بررسی حالت اول

در این حالت قبل از اینکه لغزش موتور (S) به مقدار برسد خطا برطرف می‌گردد و از آنجایی که اینرسی موتور‌ها به اندازه‌ای است که شتاب کاهنده زیادی نگیرند برای شبیه‌سازی این قسمت تغییری در اینرسی موتور‌های القائی ایجاد نمی‌نماییم.

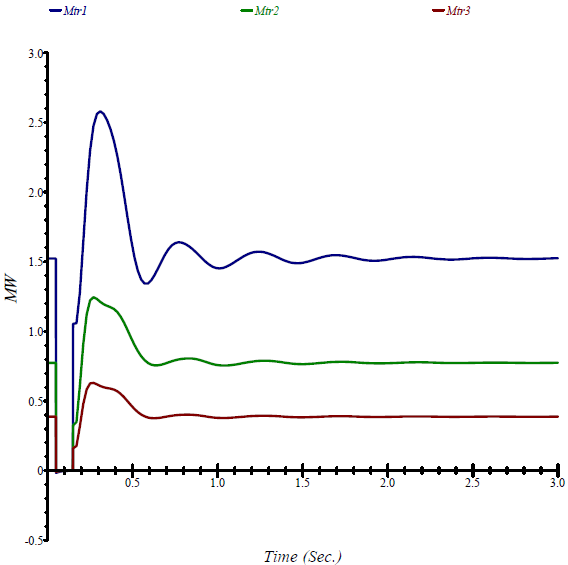
در این بخش ابتدا منحنی توان‌های اکتیو و راکتیو وگشتاور تولیدی موتور وجریان مصرفی را استخراج نموده سپس با توجه به این نمودارها به تحلیل پدیدهFIDVR می‌پردازیم.

ذکر این نکته ضروری است که در شبکه مذکور علاوه بر موتورالقائی موتور سنکرون نیز وجود دارد ولی ما در اینجا با توجه به اینکه موتور‌های سنکرون دارای منبع تحریک جداگانه میباشند که در زمان رفع خطا و مصرف توان راکتیو موتور سنکرون می‌تواند از آن استفاده کرده و توان راکتیو اضافی از شبکه کشیده نشود. اما موتور القائی به دلیل عدم داشتن منبع تحریک جداگانه تنها مصرف‌کننده توان راکتیو از سیستم می‌باشد و همواره به عنوان عنصری پسیو در شبکه مدل می‌گردد و دارای ضریب توان پس‌فاز می‌باشد.

همانطور که که قبلاً هم گفته شد ،دلیل دیگر تحلیل موتور‌های القائی این نکته است که این نوع موتورها در صنعت با تجمع بالا به کار گرفته می‌شوند که این تراکم بالا از بارهای دینامیکی خود یکی از عوامل بروز پدیده FIDVR می‌باشد.

3-4-4-1-1 توان اکتیو موتورهای پست دوم

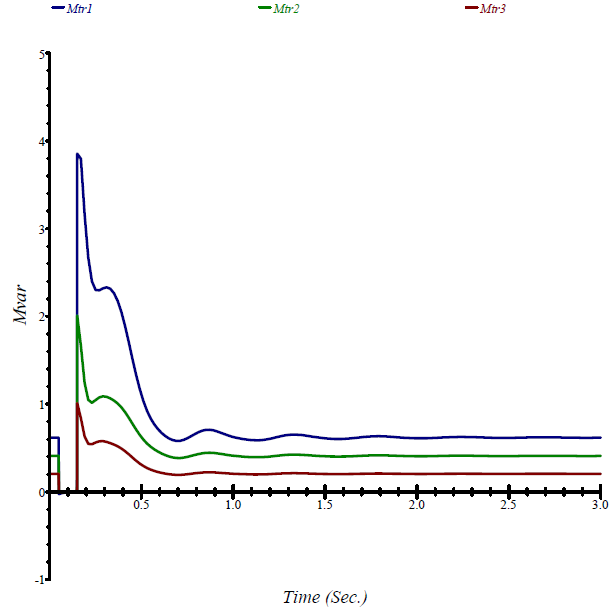
درنمودار شکل(3-10) مشاهده می‌شود که بلا‌فاصله پس از رفع خطا موتورها توان اکتیو زیادی را از شبکه جذب نموده و صرف شتاب دادن به روتور خود می‌کنند و پس از مدت کوتاهی توان اکتیو مصرفی موتور به حالت عادی باز می‌گردد.

****

شکل(3-10): نمودار تغییرات توان اکتیو موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-1-2 توان راکتیو موتورهای پست دوم

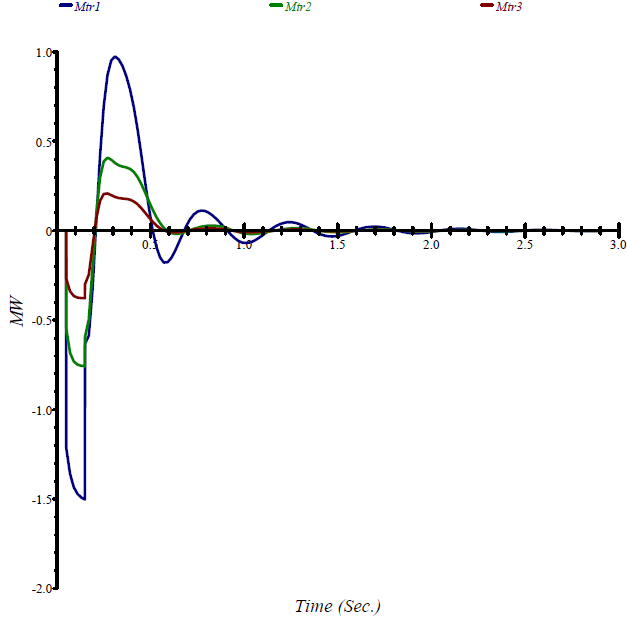
همانند نمودار مربوط به توان اکتیو در نمودار شکل(3-11) که مربوط به توان راکتیو مصرفی موتور است شاهد مصرف توان راکتیو شدید توسط موتور پس از رفع خطا هستیم که در بخش‌های بعد به توضیح دلیل آن می‌پردازیم.



شکل(3-11): نمودار تغییرات توان راکتیو موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-1-3 **گشتاور موتورهای پست دوم**

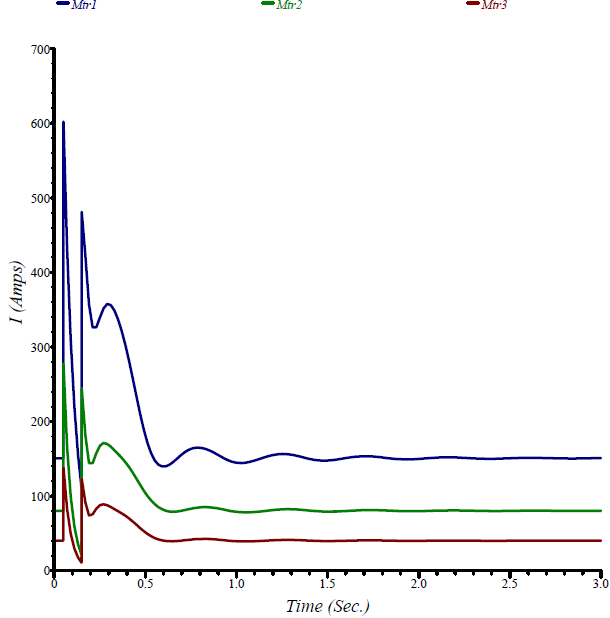
از آنجایی که گشتاور بار متصل به موتور ثابت است و همچنین در لحظه وقوع خطا گشتاور‌الکترومکانیکی تولیدی موتور صفرمی‌باشد بنابراین در هنگام وقوع خطا گشتاور محرک بار منفی بوده و سرعت موتور کاهش می‌یابد اما بلافاصله پس از رفع خطا به موتور با یک گشتاور برآیند مثبت شتاب گرفته و به سرعت نامی می‌رسد و پس از آن گشتاورهای الکترومکانیکی تولیدی موتور و گشتاور بار برابر شده و گشتاور خالص وارد شده به شفت موتور صفر می‌شود.شکل(3-12)



شکل(3-12): نمودار تغییرات گشتاور محرک موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-1-4 **جریان مصرفی موتورهای پست دوم**

همانطور که در نمودارهای قبلی مشاهده کردیم پس از رفع خطا توان اکتیو و راکتیو شدیدی توسط موتور از شبکه کشیده می‌شود در نتیجه همانطور که در نمودار شکل(3-13) هم مشاهده می‌شود پس از رفع خطا جریان شدید از شبکه کشیده می‌شود.

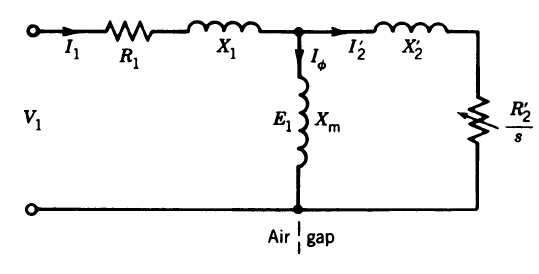
****

شکل(3-13): نمودار تغییرات جریان مصرفی موتورهای متصل به پست دوم

**3**-4-4-1-5 تحلیل ونتیجه‌گیری

در هنگام اتصال کوتاه در شبکه، موتور که پیش از این از شبکه انرژی دریافت و آن را به حرکت وگشتاور تبدیل می‌نمود اکنون به عنوان یک منبع انرژی (روتور دوار) رفتار نموده و با گذشت زمان از سرعت این منبع دوار کاسته می‌شود و انرژی ذخیره شده در روتور صرف غلبه بر تلفات خواهد شد به همین دلیل زمانی که اتصال کوتاه رخ می‌دهد یک پیک جریان در نمودار مربوط به جریان موتور‌ها دیده می‌شود که ناشی از تبدیل موتور‌القائی به ژنراتور برای مدت کوتاه می‌باشد به این جریان اصطلاحاً جریان مشارکت موتوری گفته می‌شود و میزان آن معمولاً برابر جریان راه‌اندازی موتور در نظر گرفته می‌شود.

حال به بررسی رفتار موتور پس از رفع خطا می‌پردازیم، همانطور که می‌دانیم در یک موتور القائی سه فاز رابطه (3-12) بین جریان و لغزش برقرار است.شکل(3-14)مدار معادل یک فاز موتور‌القائی رانشان می‌دهد.



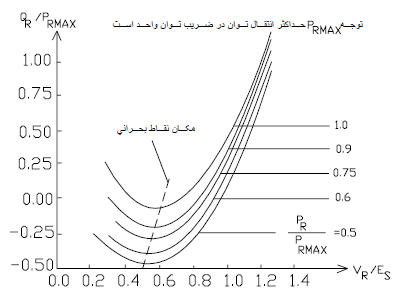
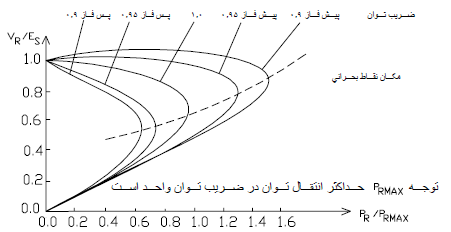
شکل(3-14):مدار معادل یک فاز موتور‌القائی

(3-14) (3-13) (3-12) = ´

هنگامی که ولتاژترمینال موتورکاهش می‌یابد طبق شکل نمودار(3-8) سرعت موتور‌القائی نیزکاهش می‌یابد..از طرفی در فرمول(3-12) مشاهده می‌شود که جریان‌القائی روتور رابطه مستقیم با لغزش موتور داشته و هنگامی که لغزش موتور افزایش یابد جریان‌القائی روتور و در نتیجه جریان استاتور به شدت افزایش می‌یابد از این رو طبق فرمول (3-13) توان اکتیو مصرفی موتور افزایش می‌یابد و از نظرفیزیکی هم این لحظه ،همان لحظه شتاب گرفتن موتور برای رسیدن به سرعت نامی می‌باشد که مطمئناً توان مکانیکی زیادی را مصرف می‌کند.از طرفی دیگر با افزایش جریان روتور و متعاقباً استاتور توان راکتیو مصرفی در اندوکتانس‌های نشتی موتور نیز که طبق رابطه(3-14) با توان دوم جریان رابطه دارند، افزایش می‌یابد.

اما هدف اصلی ما بررسی پدیده FIDVR می‌باشد که برای تحلیل آن و رابطه آن با نمودار‌ها وتوضیحات قبل نیاز است کمی به عقب تر و فصل پیش باز‌گردیم تا متوجه علت وقوع این پدیده گردیم.

همانطور که در فصل قبل، پایداری ولتاژ برای یک سیستم دو شینه ساده مورد بررسی قرار‌گرفت ،میتوان این تحلیل را بدون از دست‌دادن کلیت برای یک شبکه با تعداد شین‌های بیشتر استفاده کرد، در این صورت اگر توان اکتیو مصرفی در یک شین برابر و توان راکتیو مصرفی در نظر گرفته‌شود طبق تحلیل صورت گرفته در فصل پایداری ولتاژ رابطه بین ولتاژ باس و توان اکتیو و راکتیو مصرفی آن به صورت منحنی‌های زیر می‌باشد:



شکل(3-15): رابطه بین توان اکتیو مصرفی شین و ولتاژ شبکه شکل(3-16): رابطه بین توان راکتیو مصرفی شین و ولتاژ

از نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که با افزایش تقاضای توان اکتیو و راکتیو توسط بار، ولتاژ افت می‌کند. البته این تقاضا محدودیت هایی دارد زیرا اگر از مقدار توان های اکتیو و راکتیو مصرفی در ضریب توان ثابت از یک مقدار مشخص بیشتر گردد ولتاژ وارد ناحیه ناپایدار شده و پایداری ولتاژ شبکه ازدست خواهد رفت.

بنابراین علت بازیابی آهسته ولتاژ پس از رفع خطا در پست دوم را باید در مصرف توان راکتیو و اکتیو شدید توسط موتورهایی دانست که شروع به ذخیره انرژی مغناطیسی در هسته وهمچنین شتاب گرفتن می‌کنند.

تحلیل صورت گرفته در بالا بر اساس این فرض بود که خطا قبل از رسیدن لغزش موتورالقائی به برطرف گردد حال فرض می‌کنیم که خطا تا آن زمان برطرف نگردد یا حالت متداول‌تر اینکه به علت اینرسی پایین بار متصل به موتور شتاب کاهنده موتور به حدی زیاد باشد که قبل از رفع خطا لغزش از مقدار عبور نماید. در بخش بعدی به بررسی این حالت پرداخته شده است.

3-4-4-2 بررسی حالت دوم

برای تحلیل این حالت، ابتدا باید اینرسی بار و کوپلینگ متصل به دو موتور اول را تا حد قابل توجهی کاهش دهیم تا مطمئن شویم که قبل از رفع خطا لغزش این دو موتور فراتر از رود. تغییرات اینرسی دو موتور در جدول (3-7) آورده شده است.

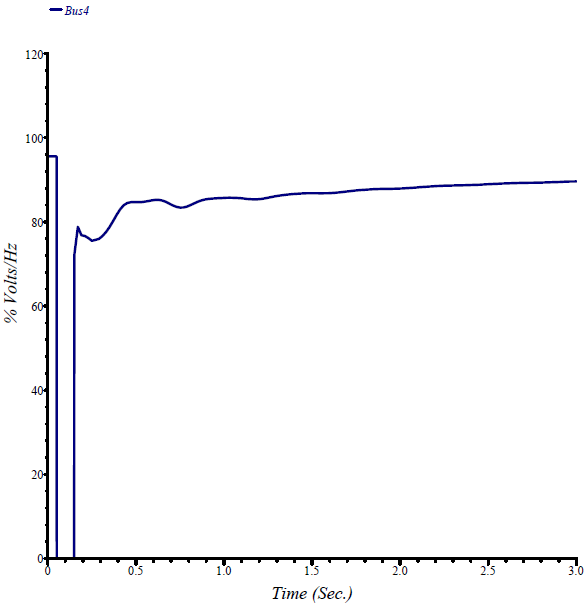
جدول (3-7): مشخصات جدید بار موتور های القایی 1و2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| اینرسی بار و کوپلینگ تغییر یافته | اینرسی بار و کوپلینگ اولیه |  |
| 2/0 | 54/1 | موتور اول |
| 12/0 | 25/1 | موتوردوم |

حال دوباره به کمک شبیه‌سازی رفتار موتورها را پس از رفع خطا مشاهده و سپس آن را تحلیل کرده و نتیجه‌گیری می‌کنیم.

3-4-4-2-1 ولتاژ پست دوم

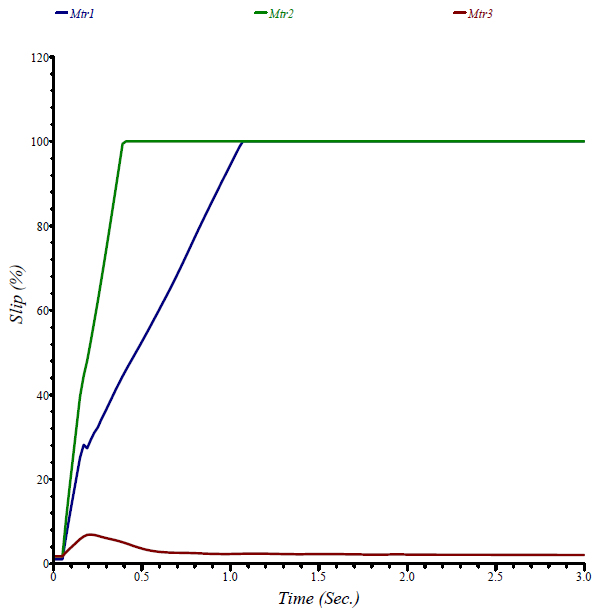
در نمودارشکل(3-17) مشاهده می‌شود که پس از رفع خطا پدیده FIDVRرخ داده است و همچنین مقدار نهایی ولتاژ با مقدار نامی یا اولیه آن اختلاف داشته و کمتر می‌باشد.

****

شکل(3-17): نمودار تغییرات ولتاژ پست دوم

3-4-4-2-2 تغییرات لغزش موتورهای پست دوم

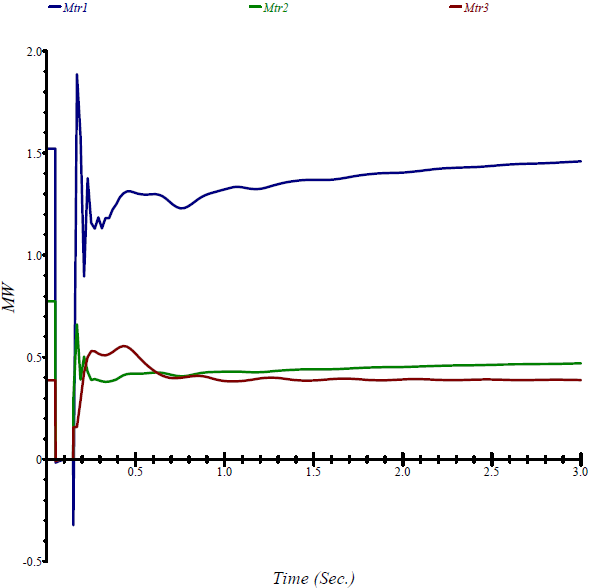
با توجه به نمودار شکل(3-18) می‌توان مشاهده نمود که پس از مدتی موتورهای1و2 فارق از رفع خطا و بازگشت ولتاژ ،متوقف خواهند شد و پس از آن دیگر دور نمی‌گیرند.

****

شکل(3-18): نمودار تغییرات لغزش موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-2-3 توان اکتیو موتورهای پست دوم

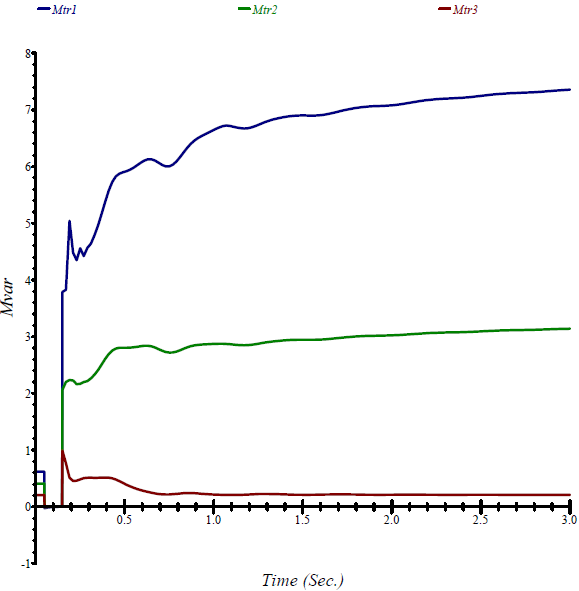
با توجه به اینکه موتورهای1و2 پس از مدتی متوقف می‌شوند بنابراین توان الکتریکی مصرفی موتورها به جز لحظه اول پس از رفع خطا کمتر از مقدار اولیه خواهد بود و تنها صرف غلبه بر تلفات مسی ، هیسترزیس و فوکو می‌شود دلیل آن هم این است که با توقف موتورها ،توان تولیدی آن‌ها صفر می‌گردد.این موضوع در نمودار شکل(3-19) مشاهده می‌گردد.

****

شکل(3-19): نمودار تغییرات توان اکتیو موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-2-4 توان راکتیو موتورهای پست دوم

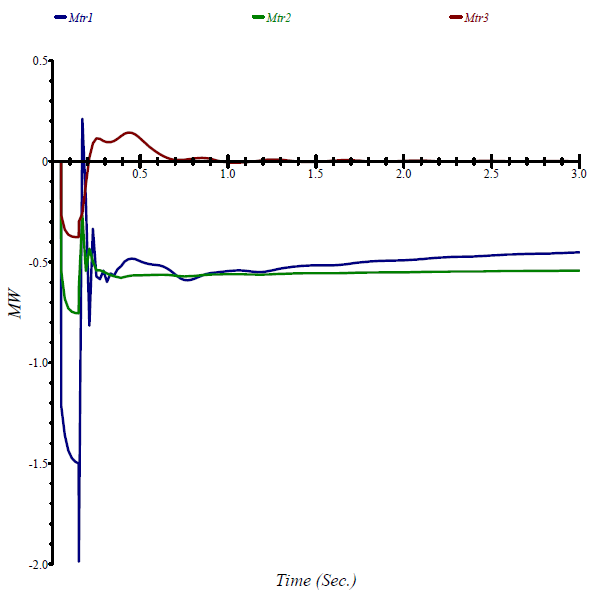
همانطور که در نمودار شکل (3-20) دیده می‌شود پس از رفع خطا توان راکتیو مصرفی موتور‌های1و2 افزایش می‌یابد تا جایی که به یک مقدار ثابت می‌رسد واز آن پس ثابت می‌ماند.دلیل این موضوع را می توان در این یافت که با توقف موتور مقدار لغزش برابر 1 میشود که بیشترین مقدار درحالت موتوری بوده بنابراین جریان مصرفی موتور حداکثر می‌باشد و از آنجایی که طبق رابطه (3-14) توان راکتیومصرفی در اندوکتانس نشتی با توان دوم جریان رابطه مستقیم دارد، در نتیجه توان راکتیو مصرفی افزایش یافته‌ ودر انتها ثابت‌می‌ماند.



شکل(3-20): نمودار تغییرات توان راکتیو موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-2-5 گشتاور موتورهای پست دوم

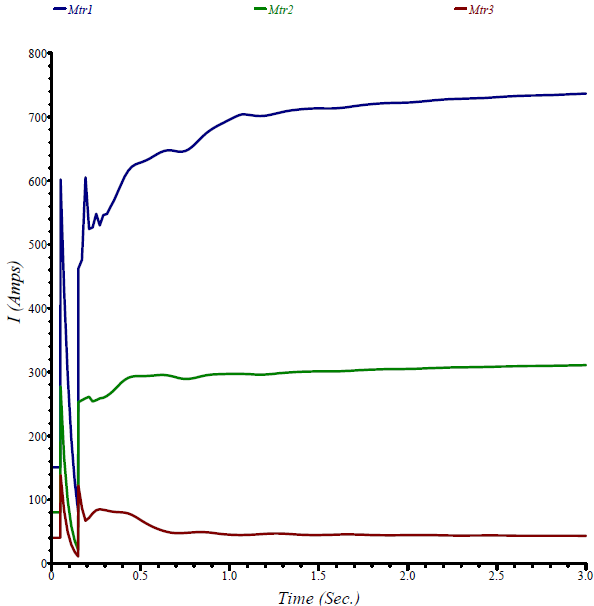
درلحظه‌وقوع خطا گشتاورهای‌خالص روی موتورها منفی‌می‌گردد‌اما پس از رفع خطا گشتاورخالص روی‌شفت موتور3 در نهایت صفر می‌گردد، اما از آنجایی که موتورهای 1و2 قفل شده اند و ازطرفی دیگر بار روی این دو موتور ازنوع گشتاور ثابت است بنابراین گشتاور خالص روی موتورهای 1و2 منفی است.شکل(3-21)



شکل(3-21): نمودار تغییرات گشتاور محرک موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-2-6 جریان مصرفی موتورهای پست دوم

با توجه به رابطه(3-12) می‌توان دریافت که زمانی که موتور متوقف شده است جریانی معادل با چندین برابر جریان نامی از شبکه کشیده می‌شود که این نکته در نمودار شکل (3-22) به خوبی دیده می‌شود.



شکل(3-22): نمودار تغییرات جریان مصرفی موتورهای متصل به پست دوم

3-4-4-2-7 تحلیل ونتیجه گیری

در این موارد که پس از رفع خطا لغزش موتور بیشتر از می‌باشد موتور وارد ناحیه ناپایدار می‌شود و حتی پس از رفع کامل خطا نیز در این ناحیه باقی می‌ماند در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود موتور قفل شده است. دلیل این موضوع هم آن ‌است که زمانی که لغزش موتور از فراتر برود حتی پس از رفع خطا نیز نقطه کار پایداری در موتور ایجاد نمی‌گردد و از آن پس لغزش موتور به شدت افزایش می‌یابد تا سر انجام موتور متوقف گردد. در این صورت حتی اگرخطا به صورت کامل رفع گردد و ولتاژ به حالت اولیه باز گردد با توجه شکل (3-23) گشتاور راه‌اندازی موتور از گشتاور بار کمتر می‌شود و موتور دیگر قادر به دورگیری مجدد و برگشت به حالت اولیه نمی‌باشد]22[.

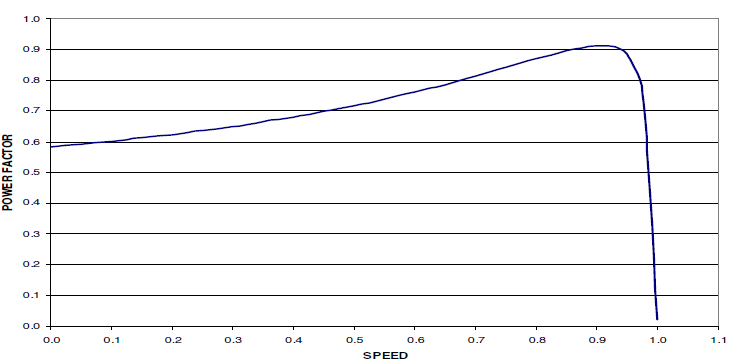


شکل(3-23): تغییرات منحنی گشتاور-سرعت در هنگام افزایش مجدد ولتاژ.]21[

برای تشریح دقیق‌تر نمودار‌های شبیه‌سازی نیاز به یک مدل جدید از بار در این ناحیه می‌باشد که این مدل‌سازی در ]23[ انجام گرفته‌شده و در ادامه به تحلیل آن پرداخته می‌شود.

3-4-4-2-8 مدل موتورالقائی قفل شده

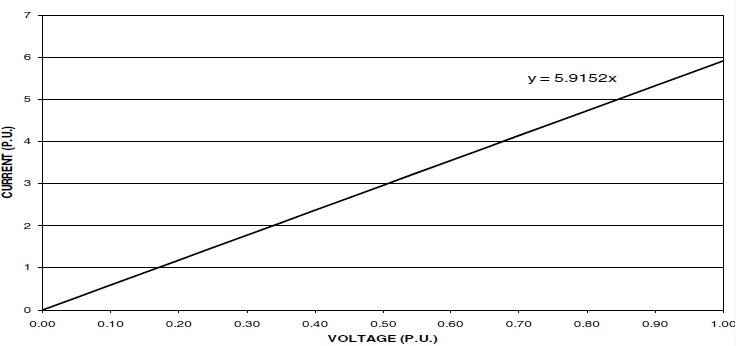
مدل موتور القایی قفل شده ابتدا در سال 1992 در]19[ مطرح شد و تنها از دو المان در این مدل استفاده گردید، ضریب قدرت و جریان،ضریب قدرت یک موتورالقایی فارق از تغییرات ولتاژ بوده و تنها به لغزش وابسته می‌باشد. (شکل 3-24)، ولی جریان موتور طبق رابطه (3-12)به هردو پارامتر ولتاژ و سرعت وابسته می‌باشد.



شکل(3-24): نمودار تغییرات ضریب قدرت بر اساس تغییرات سرعت در یک موتورالقائی نمونه.]19[

شکل (3-25) رابطه بین جریان مصرفی موتور و ولتاژ ترمینال آن را در حالتی که موتور قفل شده است(سرعت موتور=0) نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل(3-25) ورابطه (3-12) مشخص است زمانی که موتور قفل شده است (1s=)رابطه بین ولتاژ موتور و جریان مصرفی خطی است با بازگشت ولتاژ به میزان نامی خود این جریان به جریانی معادل جریان راه اندازی موتور نزدیک می‌شود .



شکل(3-25): نمودار تغییرات جریان موتور براساس تغییرات ولتاژ در موتور القایی قفل شده.]19[

حال می‌توان با اطلاعات بدست آمده از ضریب قدرت و همچنین جریان بار در زمان قفل شدن، رفتار موتور را تحلیل نمود. برای مثال یک موتور القائی با مشخصات زیر فرض می‌شود .

جدول(3-8): مقدار پارامتر‌های موتور در حالت عادی

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| توان ظاهری | ضریب قدرت | توان اکتیو | توان راکتیو |
| KVA2 | 88/0 | KW 76/1 | KVAR 95/0 |

حال فرض می‌کنیم روی ترمینال‌های این موتور افت ولتاژ کمتر از p.u 6/0 رخ داده است و به علت اینرسی پایین موتور پس ازمدت کوتاهی متوقف شده است، سپس ولتاژ شبکه پس از رفع خطا به حالت عادی بازگشته، با توجه به نمودار (3-25) می‌دانیم در این حالت موتور جریانی تقریبا معادل 6 برابر جریان نامی می‌کشد و از طرفی دیگر ضریب توان موتور به میزان 58/0 رسیده است بنابراین با توجه به این اطلاعات می‌توان مقادیر پارامترهای موتور را در این حالت به صورت زیر نوشت:

جدول(3-9): مقدار پارامتر‌های موتور در حالتی که قفل شده است

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| توان ظاهری | ضریب قدرت | توان اکتیو | توان راکتیو |
| KVA83/11 | 58/0 | KW 86/6 | KVAR 64/9 |

البته مقادیر بدست‌آمده برای موتور در لحظه اول می‌باشد و همانطور که هم در بخش قبل و هم در بخش پایداری ولتاژ مطرح شد افزایش تقاضا در مصرف توان اکتیو و راکتیو به خصوص توان راکتیو موجب افت ولتاژ درباس موردنظر می‌گردد واین افت ولتاژ متعاقباً باعث افت مصرف توان راکتیو می‌گردد، بنابراین مقادیر نوشته شده برای توان‌های اکتیو و راکتیو وجریان مقادیر حالت پایدار سیستم نمی‌باشند،دلیل این موضوع هم آن است که با افت ولتاژ شبکه مقادیر توان مصرفی و جریان نیز کاهش می‌یابند تا اینکه در نهایت سیستم به حالت پایدار ولی با ولتاژ پایین‌تر از ولتاژ نامی برسد.

نتیجه گرفته شده از این مدل کاملاً در نمودارهای شبیه‌سازی قابل مشاهده می‌باشد به طوریکه در زمان قفل شدن موتور ابتدا توان اکتیو وراکتیو زیادی از شبکه کشیده می‌شود ولی در نهایت هردو به یک مقدار مشخص میرا می‌شوند و به دلیل مصرف مقدار زیاد توان راکتیو، ولتاژ نیز در حالت پایدار به زیر مقدار نامی افت پیدا می‌کند.

البته در حالت واقعی و خارج از محیط شبیه سازی اگر این اتفاق رخ دهد پس از حدود 9.5 سیکل توسط رله‌های ولتاژی موتور اتصال موتور با شبکه قطع می‌گردد و مصرف توان متوقف شده و ولتاژ باس به مقدار نامی و حتی بیشتر از مقدار نامی(به علت حذف بار از شبکه) باز می‌گردد]23[.

فصل چهارم

نتیجه‌گیری

همانطور‌که در فصل دوم بیان گردید پایداری سیستم‌قدرت یکی از مسائل مهم مورد بررسی مهندسان قدرت می‌باشد، در ارزیابی پایداری، مسأله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار­گیرد سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثر مقدار بار را تأمین نماید. همچنین باید بتواند در مقابل اغتشاش­های سخت از قبیل اتصال‌کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور و یا از دست دادن خط ارتباطی بین دو زیر سیستم، مقاوم باقی بماند.

مسأله پایداری ولتاژ شامل قسمت های مختلفی از جمله پایداری ولتاژ می‌باشد که این نوع پایداری مورد بحث ما می‌باشد، طبق تعريف IEEE ، پايداري ولتاژ عبارت است از توانايي يك سيستم قدرت در نگه‌داري ولتاژ دائمي در همه باس‌هاي سيستم بعد از بروز اغتشاش در شرايط مشخصي از بهره‌برداري.

یکی از مسائل مهم در ارتباط با پایداری ولتاژ مسئله بازیافت تأخیری ولتاژ پس از رفع خطا در شبکه‌می‌باشد که در‌ اکثر مواقع باعث می‌شود رله‌هاي حذف بار ولتاژي عملكرد نامطلوبي داشته و با‌عملكرد ‌بي‌مورد باعث‌ قطع مقادير زيادي بار و درمواردي حتي بروز اضافه ولتاژ در برخي از پست‌ها گردد.

در فصل سوم پایان‌نامه سعی شد با استفاده از شبیه‌سازی یک شبکه شعاعی ساده وهمچنین بهره‌گیری از آخرین مقالات منتشر شده راجع به پدیده بازیافت تأخیری ولتاژ پس از رفع خطا ،تحلیلی کامل از شرایط و علت وقوع این پدیده ارائه گردد که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد.

4-1 **زمان و مکان وقوع پدیده** FIDVR **در شبکه قدرت**

بررسی‌ها نشان داد که این پدیده هنگام رفع خطای اتصال کوتاه روی باس‌هایی رخ می‌دهد که بر روی آن‌ها تراکم بارهای دینامیکی (موتوری) بالا است بنابراین در صورت رفع سريع خطا در این باس‌ها، به علت رفتار ديناميكي موتور ولتاژ سريعاً بازيابي نشده و با تأخير به مقدار اوليه خود مي‌رسد. اين رفتار ولتاژ ناشي از بارهاي موتوري بوده و در بارهاي امپدانسي و استاتيكي ديده نمي‌شود.

4-2 علت وقوع **پدیده** FIDVR

علت وقوع این پدیده را باید در ماهیت بارهای دینامیکی(موتوری) یافت. از آنجایی که در هنگام وقوع خط ولتاژ ترمینال بار موتوری افت می‌کند در نتیجه گشتاور الکترومکانیکی آن کاهش می‌یابد و این اتفاق با توجه به ثابت بودن گشتاور بار موجب کاهش سرعت موتور گشته و هنگامی که خطا برطرف می‌گردد موتور‌های مذکور دوباره شروع به دور گرفتن می‌کنند و جریان راکتیو زیادی را از شبکه می‌کشند (حدود 6 برابر جریان نامی) تعداد زياد بارهاي موتوري و شروع به كار همزمان آن‌ها مي‌تواند باعث مصرف زياد توان راكتيو و افت ولتاژ مجدد شده و فرآيند بازيابي ولتاژ را با تأخير مواجه سازد.

در مواقعی که مدت زمان وجود خطا در شبکه زیاد باشد و یا اینکه بار متصل به موتور‌ها دارای اینرسی پایین باشد موتورها اصطلاحاً قفل کرده وحتی بعد از رفع خطا هم در این حالت باقی می‌مانند و با مصرف جریان راکتیو بالا مانع از بازگشت ولتاژ به میزان اولیه خود می‌گردند که در این مواقع بار باید به وسیله رله‌های ولتاژی یا جریانی از شبکه جدا گردد زیرا با مصرف توان راکتیو بالا شبکه را به سمت ناپایداری سوق می‌دهد.

منابع و مراجع

[1] C.P.Stenmetz, “ power control and stability of Electric Generatory stations. AIEE Trans., Vol.XXXIX,part II,pp. 1215, July-December, 1920.

[2] A. P. Sakis Meliopoulos, George J. Cokkinides, and George K. Stefopoulos, “Voltage Stability and Voltage Recovery: Effects of Electric Load Dynamics” School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, GA, USA, vol. 18, issue 2, May 2006, pp. 972-973.

[3] R.D.Evans and R.C.Bergvall, “ Experimental Analysis of stability and power Limitations, “ AIEE Trans., pp.39-58, 1924.

[4] D.N.Ewart and F.P.deMello,”A Digital computer program for the Automatic Determination of Dynamic stability Limits,” IEEE Trans., Vol.PAS-86,pp.867-875, july 1967.

[5] H.M. Rustebakke (editor), Electric Vtility systems and practices, jhon wiley & Sons, 1983.

[6] CIGRE Working Group 32-03,”Tentative classification and Terminologies Relating to stability problems of power systems,” Electra. NO. 56,1978.

[7] IEEE Task Force, “ proposed Terms AND pefinitions for power systems stability, “ IEEE Trans., Vol.PAS -101, pp.1894-1898, july 1982.

[8] C.Barbier and j.p.Barret, “ An Analysis of phenomena of voltage collapse on Transmisio system, “ Revue Generale d`Electricite. pp. 672-6900 october 1980.

[9] Chaitanya A. Baone, “Modeling and Simulation of Air Conditioner Motors and Investigation of Cascaded Stalling” , UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, December 18, 2009.

[10] Hemmaplardh, J.W.Manke, W.R.Pauly, and J.W.Lamont, “ Considerations for along Term Dynamic simulation program, “ IEEE Trans., Vol.PWRS-1, pp.129-135, February 1986.

[11] D.R.Davidson, D.N.Ewart, and L.K.Kirchmayer, “ Long Term Dynamic Response of power systems-An Analysis of major Disturbances, “ IEEE Trans, Vol.PAS-94, pp.819-826, May/June 1975.

[12] B.Gao, G.K.Morsion, and P.Kundur, “ voltage stability Evaluation using Modal Analysis,” IEEE Trans., Vol.PWRS-7,No.4,pp.1529-1542.

[13] P.P.schulz, “ Capabilities of system simulation Tools for Analyzing severe upsets, “ Proceedings of International symposium on power system stability. Ames, Lowa, pp.209-215, May 13-15, 1985.

[14] C.Concordia, D.R.Davidson, D.N Ewart, L.K.Kirchmayer, and R.P.Schulz., “ Long Term power system Dynamics-A New planning Dimension, “ CIGRE paper 32-13, 1976.

[15] E.G Cate, K.Hemmaplardh, J.W.Manke, and D.P.Gelopulos, “ Time Frame Notion and Time Response of the Methods in Transient, Mid-Term and Long-Term stability programs, : IEEE Trans, Vol.PAS-103, pp.143-151, January 1984.

[16] EPRI Report EL-596, “ Mid Term simulation of Electric power systems, “ Project RP 745, June 1979.

[17] Hemmaplardh, J.W.Manke, W.R.Pauly, and J.W.Lamont, “ Considerations for along Term Dynamic simulation program, “ IEEE Trans., Vol.PWRS-1, pp.129-135, February 1986.

[18] A. P. Sakis Meliopoulos, George J. Cokkinides, and George K.Stefopoulos, “Voltage Stability and Voltage Recovery: Effects of Electric Load Dynamics” ,School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, GA, USA, vol. 18, issue 2, May 2006, pp. 972-973.

[19] B.R. Williams, W.R. Schmus and D.C. Dawson, ―Transmission voltage recovery delayed by stalled air-conditioner compressors,‖ IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 3, pp. 1173-1181, August 1992.

[20] Hongbin Wu, Hsiao-Dong Chiang, *Fellow, IEEE,* Byoung-KonChoi,“Slow Voltage Recovery Response of Several Load Models: Evaluation Study” , Vol. 13, No. 3, pp.775- 781, August 2008.

[21] Chaitanya A. Baone, “Modeling and Simulation of Air Conditioner Motors and Investigation of Cascaded Stalling” , UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, December 18, 2009.

[22] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance,“Load representation for dynamic performance analysis”, IEEE Trans.Power Systems,vol. 8, no. 2, pp. 472-482, May 1993.

[23] G. L. Chinn, "Modeling Stalled Induction Motors", inProc.IEEEPower Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exposition, May 21-24, 2006, pp. 1325–1328.

**Abstract**

Voltage stability is one of the important issues in power systems, while these systems are faced with increasing loading and network development constraints. Dynamic voltage stability means the dynamic response of a power system to small and continuous disturbances or sudden and severe changes to maintain the permissible voltage across all bushes during operation. The most important factor of voltage collapse is the inability of the transmission system in response to increased reactive power demand of the network, which usually occurs due to lack of sufficient reactive power storage or inappropriate installation of compensators.

In this project, the importance of voltage stability in power systems has been addressed and how the voltage is recycled after an error. By designing a small network in ETAP v12.6 software and creating a transient short circuit fault on a specific bus, the changes made to the voltage across different areas are observed.